

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ПРИМЕРАХ И ЗАДАЧАХ

Учебное пособие



Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ПРИМЕРАХ И ЗАДАЧАХ

Учебное пособие

*Под общей редакцией кандидата технических наук,
доцента А. О. Хоменко*

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета
для студентов вуза, обучающихся
по направлениям подготовки бакалавриата
по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности»

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2018

УДК 502(076)
ББК 20.1я73-5
Б40

Авторы: А. А. Волкова, В. Г. Шишкунов, А. О. Хоменко, Г. В. Тягунов

Рецензенты:

канд. экон. наук, директор Уральского межрегионального филиала
ФГБУ «ВНИИ труда» *С. М. Ильин*;

д-р экон. наук, директор Уральского центра энергосбережения и эко-
логии *В. П. Ануфриев*

На обложке использовано изображение с сайта <https://goo.gl/LQYyVo>

Безопасность жизнедеятельности в примерах и задачах : учеб. по-
Б40 собие / А. А. Волкова, В. Г. Шишкунов, А. О. Хоменко, Г. В. Тя-
гунов ; под общ. ред. канд. техн. наук, доц. А. О. Хоменко. — Ека-
теринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. — 120 с.
ISBN 978-5-7996-2392-0

Учебное пособие содержит краткие сведения по основным разделам кур-
са «Безопасность жизнедеятельности»: безопасность производственной дея-
тельности, экологическая безопасность, промышленная безопасность опас-
ных производственных объектов, безопасность в чрезвычайных ситуациях
природного и техногенного характера.

Приведены варианты типовых задач и методические указания для их са-
мостоятельного решения.

Библиогр.: 28 назв. Табл. 26. Рис. 19. Прил. 1.

УДК 502(076)
ББК 20.1я73-5

ISBN 978-5-978-5-7996-2392-0

© Уральский федеральный
университет, 2018

ВВЕДЕНИЕ

Особенность современного этапа развития общества — лавинообразный рост информации, ее быстрое устаревание. Поэтому накопление знаний при обучении является недостаточным для формирования хорошо подготовленных специалистов, обладающих инициативой и творческим потенциалом, способных самостоятельно приобретать знания, генерировать новые научные, технические и социальные идеи, а также уметь их использовать в практической деятельности.

Важнейшей задачей этапа подготовки специалистов является разработка и внедрение современных образовательных технологий формирования специалистов с высоким уровнем самостоятельности.

Настоящее учебное пособие, подготовленное преподавателями кафедры «Безопасность жизнедеятельности», содержит краткие сведения по основным разделам одноименного курса. Приведены варианты типовых задач и методические указания для их самостоятельного решения, что позволит студентам в процессе подготовки к занятиям самостоятельно получить базовые знания по основным разделам дисциплины.

Структура учебного пособия соответствует структуре курса «Безопасность жизнедеятельности», задания сгруппированы по разделам дисциплины:

- ◇ теоретические основы БЖД;
- ◇ экологические аспекты БЖД;
- ◇ безопасность производственной деятельности;
- ◇ безопасность в чрезвычайных ситуациях (ЧС).

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ БЖД

1.1. Основы теории риска

Риск — это количественная характеристика действия опасностей, которая формируется определенной деятельностью человека, то есть это *отношение числа неблагоприятных проявлений опасности к их возможному числу за определенный промежуток времени* (частота реализации опасности) [1]:

$$R = \frac{n}{N}, \quad (1.1.1)$$

где R — риск (1/год); n — число неблагоприятных проявлений опасности за год или иной период; N — число возможных проявлений опасности за тот же период времени.

Пример 1.1.1. Согласно статистическим данным ГИБДД России в 2009 г. в транспортных авариях и катастрофах погибло 30 107 человек. Определим риск гибели человека в транспортной аварии или катастрофе, 1/год:

$$R = \frac{30107}{141900000} \approx 2,12 \cdot 10^{-4}.$$

($N = 141\,900$ тыс. чел. — численность населения России в 2009 г.).

Пример 1.1.2. Определить, на сколько дней сократится продолжительность жизни (ΔT) курильщика, если известно, что средняя продолжительность жизни (T) составляет 70 лет или 25550 дней, а риск курильщика (или его индивидуальная вероятность смерти) равен $7 \cdot 10^{-2}$:

Решение:

$$R = \frac{\Delta T}{T}, \quad (1.1.2)$$

$\Delta T = R \cdot T = 7 \cdot 10^{-2} \cdot 25550 \approx 1788,5$ дней или 4,9 лет.

Различают индивидуальный и групповой (социальный) риск.

Индивидуальный риск характеризует реализацию опасности определенного вида деятельности для конкретного индивидуума.

Для производства примером расчета индивидуального риска является расчет коэффициента частоты несчастных случаев за год на конкретном предприятии или в конкретной промышленной сфере.

Коллективный риск — ожидаемое количество пострадавших в результате аварий на объекте за определенный период времени.

Групповой (социальный) риск представляет собой зависимость между частотой происшествий (аварий, катастроф, стихийных бедствий) и числом пострадавших в них людей [2].

Задача 1.1.1. Рассчитать показатель индивидуального риска травматизма, если число травмированных на производстве n , а число работающих — N чел.:

| Параметры | Варианты | | | | | | | | | |
|-----------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| n | 4 | 5 | 6 | 7 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
| N | 1525 | 1530 | 1535 | 1540 | 5000 | 5200 | 5400 | 5600 | 5800 | 6000 |

Задача 1.1.2. Чему равен индивидуальный риск травматизма на производственном предприятии, где работают N человек, если коллективный риск равен R_k ?

| Параметры | Варианты | | | | | | | | | |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| N | 1525 | 1530 | 1535 | 1540 | 5000 | 5200 | 5400 | 5600 | 5800 | 6000 |
| R_k | $3 \cdot 10^{-2}$ | $5 \cdot 10^{-2}$ | $6 \cdot 10^{-2}$ | $7 \cdot 10^{-2}$ | $2,5 \cdot 10^{-2}$ | $1,2 \cdot 10^{-2}$ | $8,4 \cdot 10^{-2}$ | $6,8 \cdot 10^{-2}$ | $7,8 \cdot 10^{-2}$ | $2,0 \cdot 10^{-2}$ |

Задача 1.1.3. Численность населения России 140 млн человек. Индивидуальная вероятность смерти (или риск) от отравления некачественным алкоголем $R = 2,4 \cdot 10^{-4}$ 1/чел·год. Рассчитать число жителей России, погибающих в год по этой причине.

Задача 1.1.4. Численность населения России 140 млн человек. Индивидуальная вероятность смерти (или риск) от употребления наркотиков $R = 4 \cdot 10^{-4}$ 1/чел·год. Рассчитать число жителей России, погибающих в год по этой причине.

1.2. Системный анализ безопасности

Системный анализ изучает закономерности образования и функционирования сложных многоуровневых систем.

Система — это совокупность компонентов, которые взаимосвязаны и взаимодействуют между собой, выполняя заданные и описанные функции в определенных условиях [1].

1.2.1. Основные положения теории надежности

Надежность — это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, позволяющих выполнять требуемые функции [3].

В настоящее время разработана системная теория надежности, которая позволяет количественным образом оценивать надежность системы. Благодаря данной теории анализ надежности осуществляется комплексно. Она включает индуктивный и дедуктивный методы анализа.

Для количественной оценки надежности применяют вероятностные методы и величины.

Одно из основных понятий теории надежности — отказ.

Отказ — это нарушение работоспособного состояния технического устройства из-за прекращения функционирования или из-за резкого изменения его параметров [3].

Теория надежности позволяет оценить вероятность отказа, т. е. вероятность того, что техническое устройство выйдет из строя или прекратит функционировать в течение заданного времени работы. В современных технических системах интенсивность отказов лежит в пределах $10^{-7} - 10^{-8}$ 1/час.

Теория надежности позволяет оценить вероятный срок службы технического устройства, то есть время, по окончании которого техническое устройство вырабатывает свой ресурс и должно подвергнуться капитальному ремонту, модернизации или замене.

Техническим ресурсом называют продолжительность непрерывной или суммарной периодической работы технической системы от начала ввода ее в эксплуатацию и до наступления предельного состояния, не позволяющего продолжать надежную эксплуатацию системы [4].

Информация о надежности технических систем накапливается в процессе их эксплуатации. Данная информация необходима для проведения дальнейших расчетов надежности. Выявляются элементы оборудования, обладающие низким техническим ресурсом, и факторы, ускоряющие или вызывающие их отказы. При этом ищут слабые места в конструкции, и вырабатываются рекомендации по их улучшению или по оптимизации режимов их работы [5].

1.2.2. Общий метод определения возможности возникновения аварийного состояния

Авария технологического оборудования — это процесс, который сопровождается разрушением зданий, сооружений, технических устройств, выбросом газов, паров, жидкостей, возможным взрывом и пожаром, резким изменением технических параметров опасных производственных объектов [4]. Технологическое оборудование, размещенное в опасных производственных помещениях, можно разбить на три основных группы:

- 1) реакционные аппараты, печи, газгольдеры, промежуточные емкости, машины;
- 2) коммуникации и трубопроводы;
- 3) арматура: задвижки, краны, фланцевые и резьбовые уплотнения и т. п.

Жидкости, газы или пары жидкостей, находящиеся в технологическом оборудовании под давлением выше атмосферного или при температуре выше температуры кипения, могут попасть в помещение при нарушении целостности оборудования. В этом случае возможны различные варианты развития аварийной ситуации: через запорную арматуру будет происходить медленная утечка вещества, при разрыве трубопровода — истечение струей, при разрыве корпуса аппарата или срыве крышки — мгновенный выброс.

В каждом случае количество вещества, попавшего в помещение, может быть определено с некоторым допущением, если, например, известен диаметр трубопровода или емкость аппарата.

При медленной утечке вещества взрывоопасная или остротоксичная смесь образуется в течение времени, которого вполне достаточно для приведения в действие вытяжной вентиляции и осуществления других противоаварийных мероприятий. При разрыве трубопроводов диаметром в несколько сантиметров опасная концентрация может образоваться в течение 2–3 мин; при разрушении аппаратов или емкостей это происходит за несколько секунд.

Таким образом, всегда необходимо знать, в какой группе элементов наиболее вероятно и возможно возникновение аварийного состояния. Для этой цели применимы вероятностные методы математической статистики.

Нормативные режимы и условия работы каждой группы оборудования можно определить по техническим паспортам и другой технической документации на данное оборудование. Но в то же время эти параметры до некоторой степени являются случайной величиной. Поэтому для определения вероятности развития аварийного состояния необходимо знать плотности вероятного распределения продолжительности службы для каждой группы оборудования.

Если все оборудование цеха может стать источником выхода опасных веществ, то, следовательно, имеется K групп оборудования по n элементов. В этом случае справедлива **теорема**: при большом числе независимых элементов с малой интенсивностью отказов суммарный поток отказов будет близок к простейшему по истечении некоторого времени, независимо от законов распределения сроков службы этих элементов.

Простейшим стационарным пуассоновским потоком называется поток, обладающий следующими тремя свойствами [6]:

- ♦ **стационарностью**, если попадание того или иного числа отказов на участок времени t зависит только от длины участка и не зависит от того, где именно на оси $0t$ расположен этот участок; если оборудование эксплуатируется на стационарном участке кривой: $\Lambda = f(t)$, где Λ — интенсивность отказов, то это условие выполняется;
- ♦ **отсутствием последействия**, если для любых неперекрывающихся участков времени число событий (в данном случае — отказов), попадающих на один из них, не зависит от числа событий (отказов), попадающих на другие участки;
- ♦ **ординарностью**, если вероятность попадания на элементарный участок Δt двух или более событий пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью попадания одного события (отказа).

В случае простейшего потока событий вероятность p появления m событий в интервале времени от t до $t + \tau$ находится по закону Пуассона:

$$p(n=m) = \frac{(\Lambda\tau)^m}{m!} e^{-\Lambda\tau}, \quad (1.2.1)$$

где $\Lambda\tau$ — среднее число событий (отказов) в интервале τ ; Λ — параметр потока отказов.

В частности, вероятность того, что за интервал времени, принятый за единицу, не произойдет ни одного отказа ($m = 0$), будет равна:

$$p(0) = e^{-\Lambda\tau}. \quad (1.2.2)$$

Для экспоненциального закона плотности вероятной длительности службы одного элемента параметр Λ можно выразить через $t_{\text{ср}}$:

$$\Lambda = \frac{1}{t_{\text{ср}}}, \quad (1.2.3)$$

где $t_{\text{ср}}$ — средний срок службы элемента.

Для K групп из n_1, n_2, \dots, n_k элементов, имеющих интенсивности отказов $\Lambda_1(t), \Lambda_2(t), \dots, \Lambda_n(t)$, параметр $\Lambda(t)$ составит:

$$\Lambda(t) = n_1 \Lambda_1(t) + n_2 \Lambda_2(t) + \dots + n_k \Lambda_k(t). \quad (1.2.4)$$

В соответствии с этой теоремой при средних сроках службы элементов T_1, T_2, \dots, T_k параметр потока отказов в целом по цеху будет иметь справедливый для любых законов распределения длительности службы элементов предел:

$$\Lambda = \frac{n_1}{T_1} + \frac{n_2}{T_2} + \dots + \frac{n_k}{T_k} = \frac{1}{T}. \quad (1.2.5)$$

По Λ или T можно определить вероятность $P(\tau)$ безотказной работы в течение промежутка времени τ :

$$p(0) = e^{-\frac{\tau}{T}} = e^{-\Lambda\tau}. \quad (1.2.6)$$

Таким образом, устанавливается связь между вероятностью безаварийной работы оборудования в течение времени τ , степенью наполненности помещения оборудованием и режимом работы со сроками службы. Вероятность B того, что отказ элемента m -й группы из K групп произойдет, можно оценить из выражения:

$$B_m = \frac{n_m \Lambda_m}{n_1 \Lambda_1 + n_2 \Lambda_2 + \dots + n_k \Lambda_k}. \quad (1.2.7)$$

Необходимо отметить, что такой качественный метод определения места возможной аварии не исключает другие методы.

Для эффективного использования описанного метода требуется количественное уточнение режима работы оборудования, сроков его службы, а также коэффициентов запаса.

Пример 1.2.1. Рассчитать вероятность отказа сложного технологического оборудования в цехе промышленного предприятия:

Дано:

- 1) емкости I — 10 шт., средний срок службы — 50 лет;
- 2) емкости II — 20 шт., средний срок службы — 100 лет;
- 3) трубопроводы — 100 пог. м, условный средний срок службы 1 пог. м — 200 лет.

Решение

Параметр потока отказов в целом цехе определится по уравнению:

$$\Lambda = \frac{1}{T} = \frac{n_1}{T_1} + \frac{n_2}{T_2} + \frac{n_3}{T_3} = \frac{10}{50} + \frac{20}{100} + \frac{100}{200} = \frac{9}{10}.$$

Для времени $\tau = 0,5$ года вероятность $p_0(\tau)$ безаварийной работы составит:

$$p_0(\tau) = e^{-\frac{\tau}{T}} = e^{-\frac{0,5 \cdot 9}{10}} = 0,63.$$

Вероятность того, что выход газа произойдет из m -й группы оборудования, можно определить из уравнения:

$$B_{m_1} = \frac{n_1 \Lambda_1}{n_1 \Lambda_1 + n_2 \Lambda_2 + n_3 \Lambda_3} = \frac{10 \cdot 1/5}{10 \cdot 1/5 + 20 \cdot 1/5 + 100 \cdot 1/2} \approx 0,0357;$$

$$B_{m_2} = \frac{n_2 \Lambda_2}{n_1 \Lambda_1 + n_2 \Lambda_2 + n_3 \Lambda_3} = \frac{20 \cdot 1/5}{10 \cdot 1/5 + 20 \cdot 1/5 + 100 \cdot 1/2} \approx 0,0714;$$

$$B_{m_3} = \frac{n_3 \Lambda_3}{n_1 \Lambda_1 + n_2 \Lambda_2 + n_3 \Lambda_3} = \frac{100 \cdot 1/2}{10 \cdot 1/5 + 20 \cdot 1/5 + 100 \cdot 1/2} \approx 0,893.$$

Вывод: наиболее вероятным источником образования взрывоопасной смеси в данном цехе при аварии оборудования следует считать трубопроводы.

Задача 1.2.1. В цехе, отнесенном по пожарной опасности к категории А [6], взрывоопасные газообразные продукты находятся в следующем технологическом оборудовании:

- ◇ емкости I объемом 50 м^3 в количестве n_1 шт.; средний срок службы T_1 лет;
- ◇ емкости II объемом 25 м^3 в количестве n_2 шт.; средний срок службы T_2 лет;
- ◇ трубопроводы диаметром 250 мм, общая длина n_3 пог. м; условный средний срок службы 1 пог. м — T_3 лет.

Оценить вероятный аварийный выход газа в атмосферу помещения цеха за время между ревизиями оборудования (т.е. в течение 6 мес.). Варианты заданий приведены в табл. 1.

Таблица 1

Варианты заданий к задаче 1.2.1

| Вариант | Емкости I | | Емкости II | | Трубопроводы | |
|---------|------------|--------------------------|------------|--------------------------|---------------|---------------------------------|
| | Количество | Средний срок службы, лет | Количество | Средний срок службы, лет | Длина, пог. м | Средний срок службы, лет/пог. м |
| 1 | 20 | 60 | 10 | 100 | 50 | 200 |
| 2 | 12 | 80 | 25 | 75 | 100 | 150 |
| 3 | 15 | 75 | 18 | 80 | 100 | 200 |
| 4 | 8 | 60 | 22 | 100 | 160 | 250 |
| 5 | 16 | 90 | 19 | 75 | 190 | 220 |
| 6 | 24 | 90 | 14 | 70 | 120 | 220 |
| 7 | 16 | 55 | 15 | 85 | 120 | 200 |
| 8 | 18 | 85 | 21 | 100 | 140 | 190 |
| 9 | 20 | 75 | 18 | 70 | 80 | 150 |
| 10 | 11 | 100 | 24 | 55 | 60 | 250 |
| 11 | 13 | 70 | 20 | 50 | 125 | 180 |
| 12 | 15 | 65 | 22 | 50 | 90 | 270 |
| 13 | 23 | 70 | 19 | 90 | 75 | 160 |
| 14 | 16 | 50 | 17 | 55 | 60 | 150 |
| 15 | 17 | 60 | 15 | 60 | 140 | 250 |
| 16 | 14 | 65 | 10 | 80 | 80 | 210 |
| 17 | 20 | 75 | 18 | 80 | 130 | 240 |
| 18 | 12 | 65 | 17 | 60 | 110 | 200 |
| 19 | 15 | 55 | 21 | 70 | 120 | 250 |
| 20 | 18 | 100 | 20 | 75 | 75 | 200 |
| 21 | 12 | 95 | 16 | 65 | 95 | 260 |
| 22 | 23 | 80 | 15 | 80 | 60 | 180 |
| 23 | 18 | 70 | 16 | 90 | 50 | 240 |
| 24 | 10 | 95 | 13 | 50 | 80 | 230 |

1.3. Общая характеристика методов анализа систем «Прямые и обратные методы»

В рамках системного анализа может быть изучено взаимодействие различных элементов системы и связи между ними. При этом реальный технологический процесс или техническое устройство представляется в виде некоторого образа, называемого **моделью системы**. Под моделями понимают отображения всех параметров систем, выполненные таким образом, что они передают взаимосвязь этих параметров. Моделирование неизбежно сопровождается некоторым упрощением и формализацией взаимосвязей в системе. Эта формализация может быть осуществлена в виде логических (причинно-следственных) и/или математических (функциональных) отношений.

1.3.1. Системный подход при оценке безопасности систем

Цель системного анализа безопасности состоит в том, чтобы выявить причины, влияющие на появление нежелательных событий (аварий, катастроф, пожаров, травм и т.д.), и разработать предупредительные мероприятия, уменьшающие вероятность появления этих событий.

Проблему анализа надежности системы можно разделить на два главных аспекта:

- 1) определение и описание типов отказов и сбоев;
- 2) определение последовательности или комбинации отказов между собой и с «нормальными» событиями, приводящими к появлению сбоя системы.

После исследования различных видов отказов и их последствий переходят к поиску предупредительных мероприятий. Данный поиск базируется на информации, полученной на предшествующих стадиях изучения системы. С целью идентифицировать опасности были разработаны многочисленные процедуры и методики анализа систем.

1.3.2. Априорный и апостериорный анализ безопасности систем

Анализ эксплуатационной безопасности системы осуществляется **априорно** или **апостериорно**, т.е. до или после возникновения нежелательного события. В обоих случаях используемый метод может быть прямым или обратным.

Априорный анализ проводится до реализации нежелательного события на основании данных о вероятности его развития и факторах, к нему приводящих. При этом выбираются такие нежелательные события, которые являются потенциально возможными в конкретных граничных условиях. Составляется набор различных факторов и ситуаций, приводящих к появлению опасного состояния системы.

Апостериорный анализ — это анализ причин, приведших к реализации нежелательного события. Он выполняется только после того, как нежелательное событие уже произошло. Основной целью такого анализа является разработка рекомендаций на будущее [2].

Оба вида анализа взаимно дополняют друг друга. Сложные технические системы анализируются на предмет безопасности и надежности в приоритетном порядке. Порядок анализа зависит от того, что в настоящий момент известно по изучаемой проблеме. При изучении сложной системы, характеристики которой известны и четко определены (например, машина или производственная установка), предшествующий опыт позволяет осуществить весьма детализированный априорный анализ. Если мы изучаем новую систему, то для априорного анализа необходимы данные апостериорного анализа, основанного на исследовании неизвестных факторов и событий, имевших место при работе аналогичных систем или частей подобных систем.

При анализе сложных систем, включающих в себя человека или управляемых человеком (рабочие смены, цехи или заводы), апостериорный метод дает наиболее достоверные результаты. Это происходит вследствие того, что предшествующий опыт не всегда достаточен для детального и надежного априорного анализа влияния человеческого фактора на систему.

В то же время апостериорный анализ может стать базой для последующего априорного анализа. При таком подходе можно делать выводы, выходящие за рамки единичного процесса, последствием которого стало нежелательное событие. Одновременно анализируются различные события, которые могли бы привести к такому или подобным нежелательным событиям.

Как правило, логическая последовательность большого числа событий может быть проанализирована прямым и обратным методом. При использовании прямого (индуктивного) метода анали-

зируются причины, чтобы предвидеть последствия. При обратном (дедуктивном) методе анализируются последствия, чтобы определить причины.

Дедуктивный метод используют после реализации нежелательного сценария или события, например аварии оборудования или несчастного случая. При его использовании проводится анализ в обратном направлении к предшествующим событиям, среди них ищут предпосылки к реализации негативного сценария, которые в дальнейшем необходимо исключать, поскольку они могут быть причиной неблагоприятных последствий в будущем. Конечная цель таких анализов всегда одна — предупреждение и предотвращение реализации нежелательных событий.

1.3.3. Дерево причин и опасностей как система

Факт реализации опасности является следствием действия одной или нескольких причин или событий. Вследствие этого предотвратить опасность или иначе защититься от нее возможно только при выявлении причин, приводящих к реализации опасности. Между опасными событиями и причинами, их вызывающими, существует причинно-следственная связь. Данную связь можно проследить, построив иерархические, цепные структуры, или системы. Графическое изображение таких зависимостей напоминает ветвящееся дерево, поэтому в литературе используются такие термины, как «дерево причин», «дерево отказов», «дерево событий» и т. п. [2, 7].

При построении графических схем «деревьев» используются ветви причин и ветви опасностей, они отражают характер причинно-следственных связей событий. Разделение этих ветвей нецелесообразно, а иногда и невозможно, поэтому полученные в процессе анализа безопасности объектов графические изображения называют **деревьями причин и опасностей** [8].

Построение деревьев причин и опасностей — одна из наиболее эффективных процедур для выявления причин различных нежелательных событий (аварий, травм, пожаров, ДТП и т. д.).

Многоэтапный процесс построения ветвей «дерева» требует введения ограничений для роста его пределов. Границы ветвления регулируются логической целесообразностью получения новых ответвлений. Они определяют разрешающую способность «дерева».

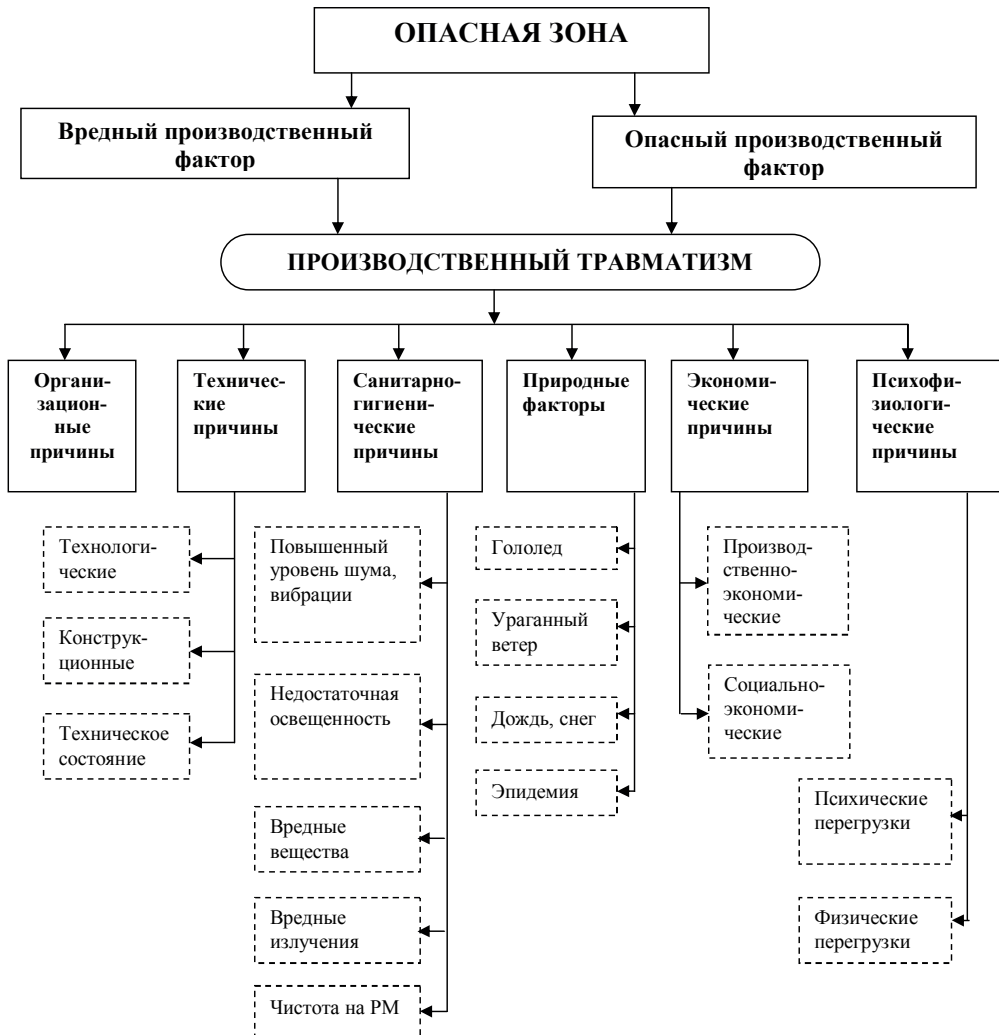


Рис. 1. Пример дерева причин несчастных случаев на производстве

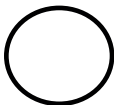
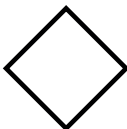


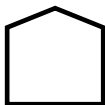

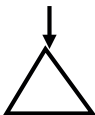
1.3.4. Моделирование опасных ситуаций методом дерева отказов

Широкое распространение при анализе безопасности получили диаграммы, называемые **дерево отказов**. Диаграмма включает одно нежелательное событие-происшествие — отказ, которое размещается вверху и соединяется другими событиями-предпосылками с помощью соответствующих связей и логических условных обозначений. Узлами «дерева» служат как события, так и условия. Для построения и анализа

таких «деревьев» используют символы событий (табл. 2) и логические символы действий (табл. 3) [5].

Таблица 2

Символы событий

| № | Символ события | Содержание события |
|---|---|--|
| 1 |  | Исходное событие, обеспеченное достаточными данными (первичный отказ) |
| 2 |  | Событие, недостаточно детально разработанное (вторичный отказ) |
| 3 |  | Событие, вводимое логическим элементом (стоит над логическим символом) |
| 4 |  | Условное событие, используемое с логическим знаком «запрет» |
| 5 |  | Событие, которое может случиться или не случиться |
| 6 |   Перенос «в» Перенос «из» | Символы переноса |

Прямоугольный блок обозначает событие отказа системы, которое возникает как результат действия элементарных отдельных отказов блоков системы, соединенных с помощью логических элементов.

Круглый блок обозначает исходный отказ отдельного элемента данной системы, который определяет, таким образом, разрешающую способность данного дерева отказов. События, представленные в круглых блоках, называются исходными событиями.

Символом «домик» обозначают событие, которое может случиться, а может и не случиться.

Ромбы используются для обозначения детально не разработанных событий, т. е. детальный анализ не доведен до исходных типов отказов из-за отсутствия необходимой информации, средств или времени.

Таблица 3

Логические символы действий

| № | Символ логического знака | Название логического знака | Причинная взаимосвязь |
|---|---|---|--|
| 1 |  | Знак «И» | Выходное событие происходит, если все входные события случаются одновременно |
| 2 |  | Знак «ИЛИ» | Выходное событие происходит, если случается любое из входных событий |
| 3 |  | Знак «Запрет по условию» | Наличие входа вызывает появление выхода тогда, когда происходит условное событие |
| 4 |  | Знак «приоритетное И» | Выходное событие имеет место, если все входные события происходят в нужном порядке слева направо |
| 5 |  | Знак «исключающее ИЛИ» | Выходное событие происходит, если случается одно из (но не оба) входных событий |
| 6 |  | Знак m из n (голосования или выборки) | Выходное событие происходит, если случается m из n входных событий |

Логические символы указывают на действия, которые связывают события в соответствии с их причинными взаимосвязями. Логический знак может иметь один или несколько входов, но только один выход, или выходное действие.

Выходное действие логического знака «И» наступает только в том случае, если появляются одновременно все входные события.

Выходное действие логического знака «ИЛИ» наступает, если имеет место любое одно из указанных входных событий.

Причинные связи «И» и «ИЛИ» являются детерминированными, поскольку появление выходного события полностью определяется только наличием или отсутствием входных событий.

Есть ряд причинных связей которые имеют не детерминированный, а вероятностный характер. Например, шестиугольник является логическим знаком «запрет по условию» и используется для представления условных причинных связей. Условие, помещенное под логическим знаком запрета, называется входным событием, в то время как событие, расположенное сбоку от логического знака, называется условным. Выходное действие происходит, только если и входное событие, и условное событие имеют место. Следовательно, входное событие вызывает выходное действие с вероятностью появления условного события.

Логический знак «запрет» появляется в тех случаях, когда событие вызывается по требованию. Этот знак используется главным образом для удобства и может быть заменен логическим знаком «И» (рис. 2)¹⁾.

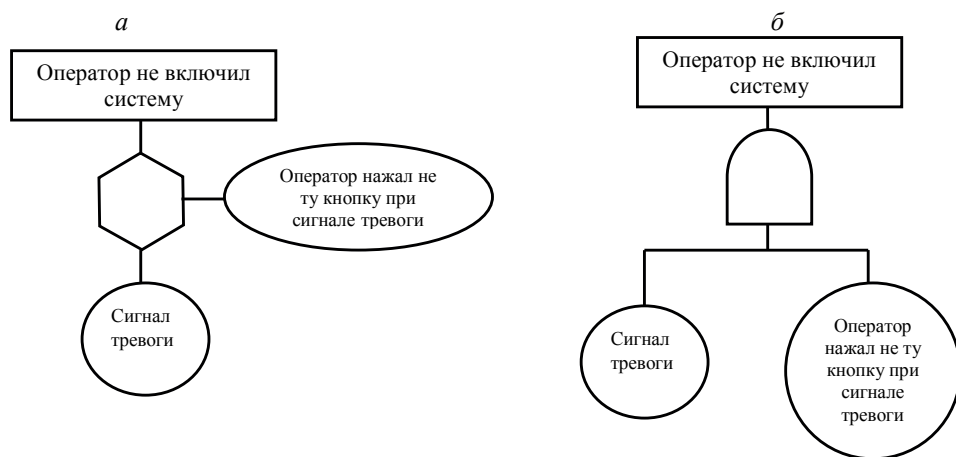


Рис. 2. Пример использования логического знака «запрет» (а) и эквивалентное представление данной схемы (б)

¹⁾ В общем случае можно ввести новые логические знаки для представления специальных типов причинных связей. Следует отметить, что большинство специальных логических знаков можно заменить комбинацией логических знаков «И» либо «ИЛИ».

Логический знак «**приоритетное И**» эквивалентен логическому знаку «**И**» с дополнительным требованием того, чтобы входные события происходили в определенном порядке. Выходное действие наступит, только если события на входе происходят в определенном порядке или последовательности. Появление входных событий в другом порядке не вызывает выходного действия.

Логический элемент «**исключающее ИЛИ**» эквивалентен логическому знаку «**ИЛИ**», но результирующее действие на выходе проявляется, в случае если на входе происходит только одно из двух входных событий, но не оба одновременно.

Логический знак **голосования или выборки m из n** имеет n событий на входе, а событие на выходе появляется, если происходит по меньшей мере m из n событий на входе.

Два треугольных символа (табл. 2) — «**перенос из**» и «**перенос в**» — обозначают два типа причинных взаимосвязей. Треугольник «перенос из» соединяется с логическим знаком сбоку, а к треугольнику «перенос в» линия связи проходит от вершины к другому логическому знаку. Треугольники используются для того, чтобы упростить изображение дерева отказов, как показано на рис. 3.

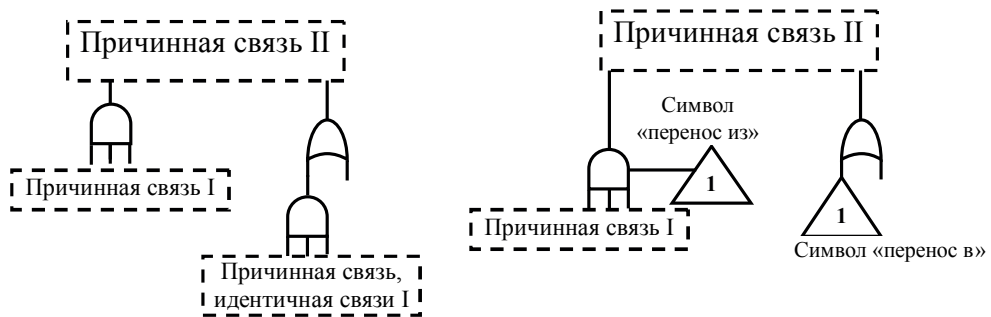


Рис. 3. Пример использования символов переноса

Пример 1.3.1. Рассчитать вероятность выходного события, используя деревья отказов, приведенные соответственно на рис. 4 и 5.

На рис. 4 и 5 приведены формулы расчета вероятности результирующего события В и Г, соответствующие обстоятельствам и условиям развития первичных событий Д и Е. Причем на рис. 5, а, операция «ИЛИ» указывает, что для того, чтобы произошло событие Г, должно произойти одно из событий — Д или Е (не исключается и свершение

обоих событий, Д и Е). В то же время на рис. 5, б, событие Г произойдет только при появлении одного из событий — или Д, или Е, — но не при их совместном возникновении.

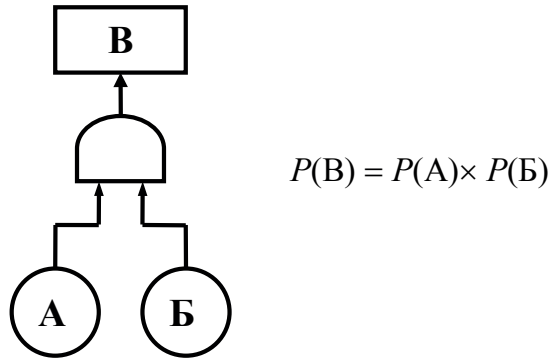


Рис. 4. Пример расчета вероятности выходных событий, вводимых знаком «И»

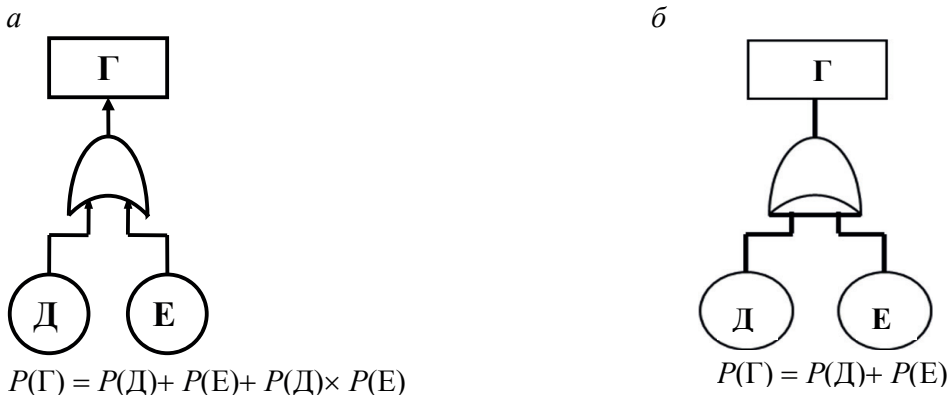


Рис. 5. Пример расчета вероятности выходных событий, вводимых знаками «ИЛИ» (а) и «исключающее ИЛИ» (б)

Пример 1.3.2. Построить дерево отказов для анализа причин поражения человека электрическим током, провести его качественный и количественный анализ (рис. 6).

Будем считать, что необходимым и достаточным условием поражения человека электрическим током является включение его тела в цепь, обеспечивающую прохождение смертельного тока. Следовательно, несчастный случай (событие А) произойдет, если одновременно будут

выполнены по крайней мере три условия: наличие потенциала на металлическом корпусе электроустановки (событие Б), появление человека на заземленном проводящем основании (событие В), прикосновение человека к корпусу электроустановки (событие Г).

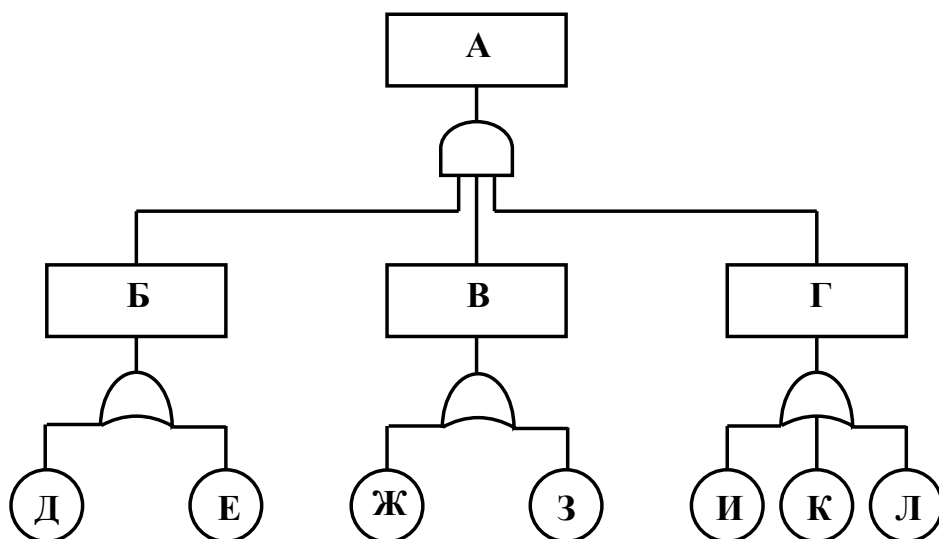


Рис. 6. Дерево отказов для анализа причин поражения человека электрическим током

В свою очередь, событие Б может быть следствием любого из событий-предпосылок Д и Е, например нарушения изоляции или смещения неизолированного контакта и касания им корпуса. Событие В может возникнуть в результате действия предпосылок Ж и З, если человек станет ногой на токопроводящее основание или коснется телом заземленных элементов конструкций помещения. Событие Г может явиться следствием одного из трех событий-предпосылок, И, К и Л: ремонта или техобслуживания оборудования или штатного режима работы установки.

Процесс анализа дерева отказов состоит в выявлении условий, необходимых и достаточных для возникновения или невозникновения головного события. Модель может давать большое число сочетаний исходных событий, которые будут приводить в совокупности к поражению человека электрическим током. В данном примере имеются двенадцать сочетаний, приводящих к данному исходу: ДЖИ, ДЖК,

ДЖЛ, ДЗИ, ДЗК, ДЗЛ, ЕЖИ, ЕЖК, ЕЖЛ, ЕЗИ, ЕЗК, ЕЗЛ. В то же время имеется три сочетания, исключающих возможность поражения током при одновременном отсутствии образующих его событий: ДЕ, ЖЗ, ИКЛ.

Уравнение расчета вероятности поражения током для исследуемого происшествия будет иметь вид:

$$P(A) = (P(D) + P(E)) \times (P(J) + P(Z)) \times (P(I) + P(K) + P(L)). \quad (1.3.1)$$

После подстановки вместо буквенных символов исходных событий значения вероятностей событий-предпосылок можно оценить риск гибели человека от электрического тока в конкретных условиях. Например, при равных значениях вероятностей $P(D) = P(E) = \dots = P(L) = 0,1$ вероятность гибели человека от электротока равна:

$$P(A) = (0,1 + 0,1) \times (0,1 + 0,1) \times (0,1 + 0,1 + 0,1) = 0,012. \quad (1.3.2)$$

Этот метод может быть использован для расчета вероятности несчастного случая на производстве или аварии оборудования.

При построении дерева отказов выделяются предшествующие события-предпосылки, между которыми устанавливаются причинные связи, кроме того, анализируются факторы, носящие постоянный характер. Логическая структура дерева отказов показывает, что при отсутствии хотя бы одного из событий-предпосылок событие «отказ» произойти не сможет. При этом, как правило, выявляются потенциально опасные факторы, не проявившие себя в настоящее время. Следовательно, анализируя дерево отказов, можно предупредить несчастный случай или аварию.

1.3.5. Анализ развития опасной ситуации методом дерева событий

Метод построения дерева событий относится к числу методик индуктивного анализа, основанных на прямой логике: от частного к общему.

Анализ начинается с исходного (инициирующего) события, и затем выстраиваются логические цепочки событий, которые могут в конечном счете привести к нежелательным последствиям.

В качестве **примера** рассмотрим анализ надежности системы, состоящей из трех агрегатов, два из которых рабочие, а третий резервный.

Обозначения:

P_1 — вероятность надежной работы 1-го агрегата;

$q_1 = 1 - P_1$ — вероятность отказа агрегата 1;

P_2 — вероятность надежной работы 2-го агрегата;

$q_2 = 1 - P_1$ — вероятность отказа агрегата 2;

P_3 — вероятность надежной работы 3-го агрегата;

$q_3 = 1 - P_3$ — вероятность отказа агрегата 3.

Исходное событие — «пуск».

Случай 1. Работают агрегаты 1 и 2; резерв отсутствует. Дерево событий для этой ситуации изображено на рис. 7.

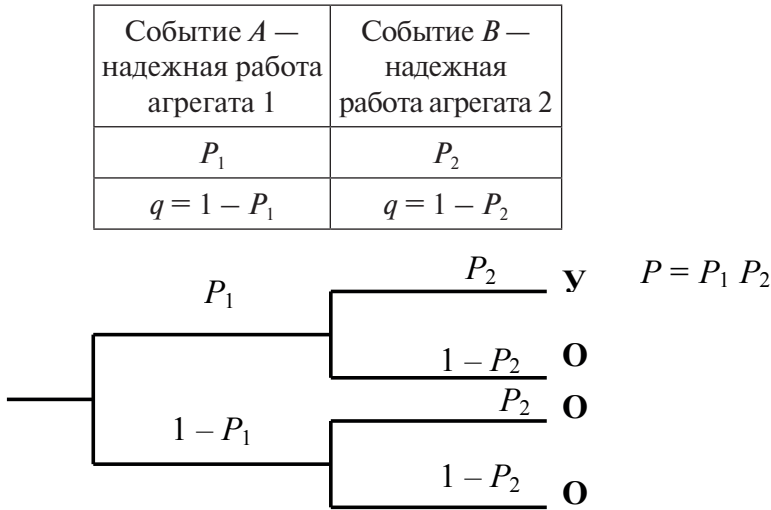


Рис. 7. Дерево событий для случая, когда агрегаты 1 и 2 рабочие

Ветвь $У$ — «успех» — соответствует успешной работе системы, а вероятность безотказной работы для этого случая определится выражением:

$$P = P_1 P_2. \quad (1.3.3)$$

Случай 2. Агрегаты 1 и 2 — рабочие, 3-й агрегат — резервный. Соответствующее дерево событий приведено на рис. 8.

В этом случае вероятность нормальной работы будет равна:

$$P = P_1 P_2 + P_1 (1 - P_2) P_3 + (1 - P_1) P_2 P_3 = P_1 P_2 + P_1 P_3 + P_2 P_3 - 2 P_1 P_2 P_3 \quad (1.3.4)$$

В качестве показателя надежности технических систем часто используют **коэффициент готовности** — K_G :

$$K_G = \frac{\tau_p}{\tau_p + \tau_0}, \quad (1.3.5)$$

где τ_p — время работы оборудования; τ_0 — время простоя.

| | | |
|--|--|---|
| Событие A — надежная ра- бота агрегата 1 | Событие B — надежная ра- бота агрегата 2 | Событие C — надежная работа агрегата 3 |
| P_1 | P_2 | P_3 |
| $q = 1 - P_1$ | $q = 1 - P_2$ | $q = 1 - P_3$ |

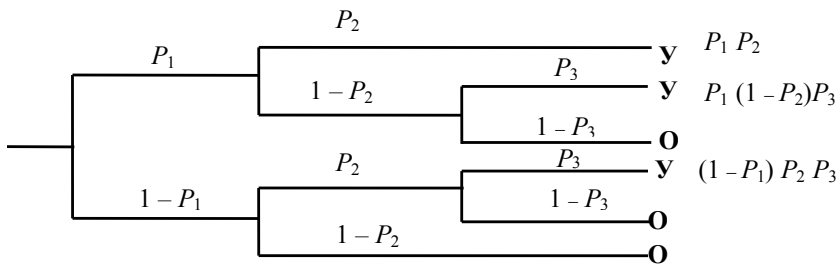


Рис. 8. Дерево событий для случая, когда агрегаты 1 и 2 рабочие, 3-й агрегат — резервный

1.3.6. Определение показателей надежности системы

Пример построения дерева отказов. Пусть агрегаты 1 и 2 — рабочие, агрегат 3 — резервный. Венчающее событие — отказ всей системы.

P_1, P_2, P_3 — вероятность нормальной работы агрегатов 1, 2 и 3.

q_1, q_2, q_3 — вероятность отказа агрегатов 1, 2 и 3.

Дерево отказов для данного случая приведено на рис. 9.

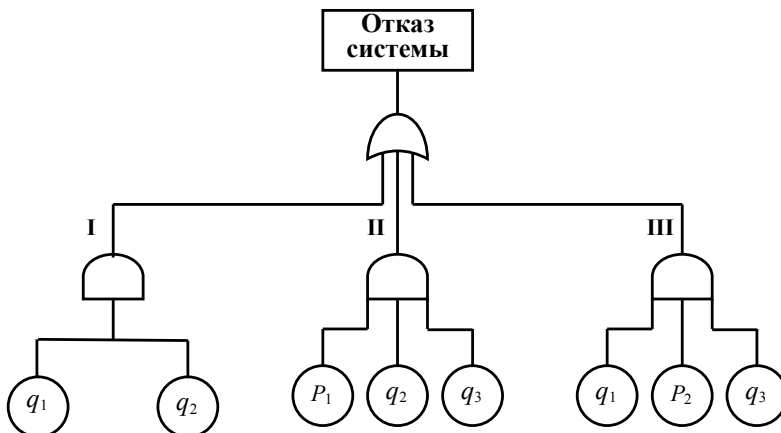


Рис. 9. Пример построения дерева отказов для случая, когда агрегаты 1 и 2 — рабочие, 3 — резервный

Пояснения. В рассматриваемом случае отказу соответствуют состояния системы:

- ◇ отказ агрегатов 1 и 2 (ветвь I);
- ◇ при нормальной работе агрегата 1 отказ агрегата 2 и резервного агрегата 3 (ветвь II);
- ◇ при нормальной работе агрегата 2 отказ агрегата 1 и резервного агрегата 3 (ветвь III).

В данном случае можно использовать и знак «запрет». Например, ветвь III можно представить так, как показано на рис. 10: при нормальной работе агрегата 1 отказ агрегата 2 приведет к отказу системы при условии отказа резервного агрегата 3.

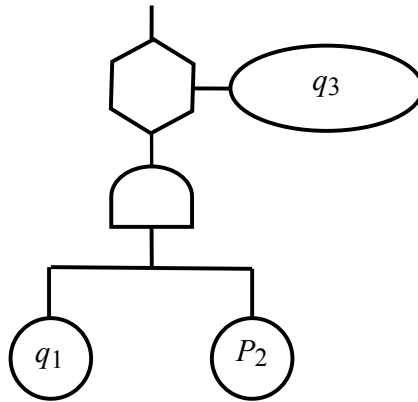


Рис. 10. Пример использования знака «запрет»

Вероятность отказа системы q может быть определена из выражения:

$$q = q_1 q_2 + P_2 q_1 q_3 + P_1 q_2 q_3. \quad (1.3.6)$$

Сравнив это выражение с выражением (1.3.4), можно показать, что вероятность отказа будет связана с вероятностью нормальной работы P соотношением $q = 1 - P$:

$$\begin{aligned} q &= (1 - P_1) (1 - P_2) + P_2 (1 - P_1) (1 - P_3) + P_1 (1 - P_2) (1 - P_3) = \\ &= 1 - P_1 - P_2 P_3 - P_1 P_2 P_3 + P_1 - P_1 P_2 - P_1 P_3 - P_1 P_2 P_3 = \\ &= 1 - P_1 P_2 - P_1 P_3 - P_2 P_3 + 2 P_1 P_2 P_3 = 1 - P. \end{aligned} \quad (1.3.7)$$

Задача 1.3.2. Определить коэффициенты готовности агрегатов (по формуле 1.3.5) для расчета надежности системы в соответствии с вариантом задания (табл. 4).

Построить дерево событий и определить показатели надежности системы для случаев:

- а) агрегаты 1 и 2 — рабочие, резерв отсутствует;
- б) агрегаты 1 и 2 — рабочие, агрегат 3 — резервный.

Таблица 4

Варианты заданий для расчета надежности

| Вариант | Агрегаты | | | | | | Вариант | Агрегаты | | | | | |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 1 | | 2 | | 3 | | | 1 | | 2 | | 3 | |
| | τ_p , ч | τ_0 , ч | τ_p , ч | τ_0 , ч | τ_p , ч | τ_0 , ч | | τ_p , ч | τ_0 , ч | τ_p , ч | τ_0 , ч | τ_p , ч | τ_0 , ч |
| 1 | 4972 | 3788 | 6352 | 2408 | 8327 | 433 | 13 | 6352 | 433 | 8024 | 874 | 6473 | 736 |
| 2 | 7817 | 943 | 7744 | 1016 | 8333 | 296 | 14 | 7744 | 523 | 1678 | 546 | 7744 | 945 |
| 3 | 8024 | 736 | 7871 | 889 | 6218 | 317 | 15 | 6473 | 874 | 6352 | 781 | 7821 | 542 |
| 4 | 5324 | 618 | 6473 | 125 | 7523 | 276 | 16 | 4380 | 231 | 5375 | 567 | 7533 | 725 |
| 5 | 7533 | 534 | 3549 | 411 | 5735 | 444 | 17 | 6976 | 943 | 8024 | 3788 | 1287 | 221 |
| 6 | 3242 | 187 | 8241 | 457 | 4245 | 245 | 18 | 2532 | 523 | 3242 | 532 | 6634 | 618 |
| 7 | 6725 | 276 | 6473 | 241 | 6744 | 287 | 19 | 3549 | 618 | 4972 | 943 | 4634 | 386 |
| 8 | 6473 | 872 | 1872 | 227 | 7533 | 242 | 20 | 3948 | 874 | 2513 | 287 | 7871 | 412 |
| 9 | 3242 | 532 | 2634 | 432 | 2532 | 523 | 21 | 8323 | 2634 | 6725 | 872 | 5735 | 187 |
| 10 | 6634 | 546 | 7523 | 874 | 6744 | 549 | 22 | 5723 | 812 | 2003 | 534 | 6473 | 362 |
| 11 | 1678 | 187 | 6725 | 187 | 3948 | 123 | 23 | 6218 | 3747 | 6782 | 1872 | 6572 | 351 |
| 12 | 6782 | 725 | 8241 | 276 | 1287 | 132 | 24 | 7817 | 444 | 2148 | 325 | 3242 | 656 |

Задача 1.3.3. Построить дерево отказов для данной системы при следующих условиях:

- ♦ венчающее событие — отказ всей системы;
- ♦ в схему добавлен еще один элемент, 4 — автоматический переключатель, который должен подключить резервный агрегат при отказе одного из рабочих, показатель надежности $P_4 = 0,98$.

Определить вероятность отказа системы для этого случая.

1.4. Оптимизация надежности энергоснабжения

1.4.1. Определение числа резервных агрегатов при заданном уровне надежности

В качестве показателя надежности сложных технических систем (систем энергоснабжения, электростанций, агрегатов энергоблоков) часто используют коэффициент готовности K_G :

$$K_G = \frac{\tau_p}{\tau_p + \tau_{ав}}, \quad (1.4.1)$$

где τ_p — время нахождения агрегата или системы в рабочем состоянии, включая время резерва; $\tau_{ав}$ — время нахождения агрегата в аварийном состоянии.

Отказ агрегата или системы характеризуется показателем q :

$$q = \frac{\tau_0}{\tau_p + \tau_{ав}}. \quad (1.4.2)$$

Один агрегат может находиться либо в том, либо в другом состоянии. Для сложной энергосистемы, состоящей из m однотипных энергетических агрегатов с единичной мощностью N , вероятности всех возможных состояний системы могут быть найдены из разложения бинома Ньютона [9]:

$$(p + q)^m = p^m + c_m^1 p^{m-1} q + \dots + c_m^j p^{m-j} q^j + \dots + q^m = 1, \quad (1.4.3)$$

где $c_m^j p^{m-j} q^j = p_{jm}$ — вероятность одновременного отказа j агрегатов.

Число сочетаний из m элементов по j :

$$c_m^j = \frac{m!}{j!(m-j)!} = \frac{m(m-1)\dots(m-j+1)}{j(j-1)\dots 1}. \quad (1.4.4)$$

Первый член данного разложения бинома показывает вероятность рабочего состояния всех энергетических агрегатов p_{om} , а последний — вероятность аварийного отказа всех агрегатов в энергосистеме — p_{mm} .

$$\sum_{j=1}^n p_{jm} = 1. \quad (1.4.5)$$

Для упрощения расчетов значения коэффициентов разложения бинома Ньютона c_m^j можно определять по треугольнику Паскаля, который строится следующим образом:

| | |
|------------------|---------|
| 1 | $m = 1$ |
| 1 2 1 | $m = 2$ |
| 1 3 3 1 | $m = 3$ |
| 1 4 6 4 1 | $m = 4$ |
| 1 5 10 10 5 1 | $m = 5$ |
| 1 6 15 20 15 6 1 | $m = 6$ |
| | |

- а) в вершине и по краям треугольника ставятся единицы;
- б) во второй строке средний член равен 2;
- в) начиная с третьей строки, каждый член между единицами получается как сумма рядом стоящих элементов предыдущей строки.

Очевидно, коэффициенты третьей строки треугольника Паскаля 1, 3, 3, 1 совпадают с коэффициентами разложения бинома третьей степени:

$$(p + q)^3 = 1p^3 + 3p^2q + 3pq^2 + 1q^3. \quad (1.4.6)$$

Элементы шестой строки треугольника Паскаля 1, 6, 15, 20, 15, 6, 1 совпадают с элементами разложения бинома шестой степени:

$$(p + q)^6 = 1p^6 + 6p^5q + 15p^4q^2 + 20p^3q^3 + 15p^2q^4 + 6pq^5 + 1q^6. \quad (1.4.7)$$

Выход из строя одного энергетического агрегата приводит к снижению мощности системы электроснабжения на N , а j агрегатов — на $j \times N$. То есть надежность системы энергоснабжения может быть оценена как вероятность отсутствия дефицита мощности.

Если обозначить через p_{-jN} вероятность снижения мощности энергосистемы, то ряд распределения вероятностей всех возможных состояний при выходе из строя агрегатов переписывается так:

$$(p + q)^m = p_{0N} + p_{-N} + \dots + p_{-jN} + \dots + p_{mN} = 1; \quad (1.4.8)$$

$$p_{-jN} = c_m^j \cdot p^{m-j} \cdot q^j. \quad (1.4.9)$$

Следовательно, при отсутствии резервных энергетических мощностей и агрегатов в системе надежность энергоснабжения p будет равна вероятности безотказной работы всех агрегатов: $p_o = p_{oN} = p_m$. Это можно записать как количество резервных агрегатов в системе $r = 0$.

При установке в системе энергоснабжения одного резервного агрегата надежность возрастет до величины $p_o = p_{oN} + p_{-N}$.

При установке r резервных энергетических агрегатов надежность энергоснабжения можно определить как:

$$p_0 = p_{0N} + p_{-N} + \dots + p_{-rN} = \sum_{j=1}^r p_{-jN}. \quad (1.4.10)$$

То есть если задать требуемое нормативное значение надежности энергоснабжения p , то, решая уравнение (1.4.10), можно определить количество резервных агрегатов и мощность аварийного резерва, необходимого для обеспечения данного уровня надежности.

Как правило, количество резервных агрегатов для обеспечения заданной надежности определяют подбором, исходя из условий:

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^{r-1} p_{-jN} \leq p_0 \leq \sum_{j=0}^{r+1} p_{-jN} \quad \text{или} \\ \sum_{j=0}^{r-1} p_{-jN} \approx \overline{p_0}. \end{aligned} \quad (1.4.11)$$

На практике при разработке проектов энергоснабжения величина p_0 задается на уровне 0,999.

1.4.2. Экономический подход к определению величины аварийного резерва

Экономический подход к оценке надежности энергоснабжения и величины аварийного резерва (числа резервных агрегатов и их мощности) основывается на сопоставлении вероятного ущерба от недостаточного отпуска электроэнергии в связи с аварийным отказом энергетического агрегата, с затратами на создание резерва мощности в электрической энергетической системе (ЭЭС) [10].

Математическое ожидание дефицита энергии в результате вероятной аварии при отсутствии резерва мощности может быть найдено из выражения:

$$\Delta W_{r=0} = N \cdot \tau \sum_j p_{-jm} \cdot j, \quad (1.4.12)$$

где $j = 1, \dots, m$ — количество вышедших из строя агрегатов.

$$\tau = \tau_{\text{раб}} + \tau_{\text{ав}}. \quad (1.4.13)$$

Установка резервных энергетических агрегатов приведет к снижению вероятности ограничения мощности в системе и будет уменьшать математическое ожидание дефицита мощности в энергосистеме.

Установка одного резервного агрегата мощностью N позволит ликвидировать дефицит электроэнергии, появившийся при одновременном выходе из строя двух агрегатов.

Установка двух резервных агрегатов нивелирует дефицит, возникший в случае выхода из строя трех энергетических агрегатов и т. д.

При установке r резервных агрегатов величину математического ожидания дефицита электроэнергии можно определить по формуле:

$$\Delta W_{r=0} = N \cdot \tau \sum_{j=r+1} (j-r) p_{-jm} = N \cdot \tau \left[C_m^{r+1} p^{m-(r+1)} q^{r+1} + 2C_m^{r+2} p^{m-(r+2)} q^{r+2} + \dots \right] + (m-r) q^m, \quad (1.4.14)$$

где m — число основных агрегатов, r — число резервных агрегатов.

Для расчета оптимального числа резервных агрегатов r в системе электроснабжения проводят сравнение постоянной составляющей приведенных затрат на резерв Z_R с математическим ожиданием ущерба от недостаточного отпуска энергии Y_R .

$$Y_R = y_R \cdot \Delta W_r; \quad (1.4.15)$$

$$Z_R = z_R \cdot N_r = (\varepsilon_n + \alpha_\Sigma) K_N N_r, \quad (1.4.16)$$

где y_R — удельный ущерб потребителя y (руб./кВт·ч) от недостаточного отпуска ему энергии; z_R — удельные приведенные затраты в резерв, руб./кВт; ε_n — нормативный коэффициент экономической эффективности дополнительных капиталовложений; α_Σ — доля постоянной части эксплуатационных расходов от капиталовложений в электростанцию; K_N — удельные капиталовложения на единицу установленной мощности резервных электростанций, руб./кВт.

Определение величины аварийного резерва по данному методу производится путем сравнения различных проектных вариантов числа установленных резервных агрегатов с учетом затрат на резервирование и ущерба от неотпуска мощности при аварии. Такой анализ удобно производить по форме, приведенной в табл. 5.

Таблица 5

Форма решения задачи надежности энергоснабжения

| Количество резервных агрегатов r | Мощность резерва N_r | Дефицит энергии при числе резервных агрегатов ΔW_r | Затраты на резерв Z_r | Ущерб Y_r | $Z_r + Y_r$ |
|------------------------------------|------------------------|--|-------------------------|------------------|----------------------------|
| 0 | 0 | W_0 | 0 | $Y_0 \Delta W_0$ | $Y_0 \Delta W_0$ |
| 1 | N | ΔW_1 | $Z_1 N$ | $Y_1 \Delta W_1$ | $Z_1 N + Y_1 \Delta W_1$ |
| r | rN | ΔW_r | $Z_r r N$ | $Y_r \Delta W_r$ | $Z_r r N + Y_r \Delta W_r$ |

Оптимальному значению резерва (r_{opt}) соответствует минимальное значение $Z_R + Y_R$ или условия, когда $\Delta Z_R \geq \Delta Y_R$, т.е. прирост затрат на резерв больше или равен уменьшению ущерба. На следующем этапе находим оптимальную мощность резерва $N_r^{\text{opt}} = r_{\text{opt}} \cdot N$ и надежность энергоснабжения:

$$p_{\text{opt}} = \sum_{j=1}^{r_{\text{opt}}} p_{-jN}. \quad (1.4.17)$$

Задача 1.4.1. На основании исходных данных, приведенных в табл. 6, определить:

- 1) оптимальное количество резервных агрегатов r_{opt} ;
- 2) оптимальную величину мощности резерва N_r^{opt} ;
- 3) оптимальный уровень надежности энергосистемы p_{opt} ;
- 4) количество резервных агрегатов для заданного уровня надежности p_{opt} .

Сравнить со значением p_{opt} , полученным ранее.

Для выполнения задачи необходимо использовать следующие указания.

1. В расчетах использовать значение нормативного коэффициента экономической эффективности дополнительных капиталовложений $\epsilon_n = 0,12$.

2. Календарное время принять $\tau_k = 8760$ ч/год.

3. Для упрощения расчетов значения коэффициентов разложения бинома Ньютона c_m^j можно определять по треугольнику Паскаля.

Варианты исходных данных для расчета оптимальной величины аварийного резерва мощности в ЭЭС в табл. 6.

Таблица 6

Варианты данных для расчетов задачи 1.4.1

| Вариант | Количество агрегатов в ЭЭС | Мощность одного агрегата N , МВт | Коэффициент готовности энергоагрегатов p | Удельные капвложения на 1 МВт резервной мощности KN_{Σ} , тыс.руб/МВт | Доля эксплуатационных расходов a_{Σ} | Удельная величина ущерба на 1 МВтч недоотпущенной электроэнергии, тыс. руб/(МВтч) Y_R |
|---------|----------------------------|------------------------------------|--|--|---|---|
| 1 | 3 | 800 | 0,9 | 150 | 0,1 | 0,013 |
| 2 | 3 | 500 | 0,9 | 120 | 0,1 | 0,01 |
| 3 | 3 | 500 | 0,8 | 120 | 0,12 | 0,009 |

Окончание табл. 6

| Вариант | Количество агрегатов в ЭЭС | Мощность одного агрегата N , МВт | Коэффициент готовности энергоагрегатов p | Удельные капиталовложения на 1 МВт резервной мощности KN_{Σ} , тыс.руб/МВт | Доля эксплуатационных расходов a_{Σ} | Удельная величина ущерба на 1 МВтч недоотпущенной электроэнергии, тыс.руб/(МВтч) Y_R |
|---------|----------------------------|------------------------------------|--|---|---|--|
| 4 | 3 | 800 | 0,8 | 100 | 0,1 | 0,005 |
| 5 | 4 | 160 | 0,8 | 150 | 0,1 | 0,01 |
| 6 | 4 | 100 | 0,8 | 150 | 0,09 | 0,008 |
| 7 | 4 | 200 | 0,9 | 120 | 0,1 | 0,01 |
| 8 | 4 | 300 | 0,9 | 150 | 0,09 | 0,014 |
| 9 | 4 | 100 | 0,95 | 100 | 0,08 | 0,03 |
| 10 | 4 | 160 | 0,95 | 110 | 0,07 | 0,035 |
| 11 | 3 | 500 | 0,85 | 150 | 0,1 | 0,01 |
| 12 | 3 | 800 | 0,85 | 100 | 0,1 | 0,01 |
| 13 | 4 | 160 | 0,85 | 150 | 0,1 | 0,01 |
| 14 | 4 | 200 | 0,85 | 120 | 0,08 | 0,008 |
| 15 | 5 | 100 | 0,85 | 100 | 0,1 | 0,008 |
| 16 | 5 | 200 | 0,85 | 120 | 0,08 | 0,0085 |
| 17 | 5 | 160 | 0,85 | 150 | 0,1 | 0,008 |
| 18 | 5 | 300 | 0,85 | 100 | 0,08 | 0,01 |
| 19 | 6 | 100 | 0,98 | 100 | 0,08 | 0,025 |
| 20 | 6 | 160 | 0,98 | 100 | 0,1 | 0,015 |
| 21 | 6 | 120 | 0,9 | 120 | 0,12 | 0,035 |
| 22 | 3 | 800 | 0,85 | 110 | 0,07 | 0,01 |
| 23 | 4 | 300 | 0,92 | 120 | 0,09 | 0,012 |
| 24 | 3 | 400 | 0,90 | 110 | 0,1 | 0,013 |
| 25 | 5 | 150 | 0,89 | 100 | 0,12 | 0,02 |

1.5. Математическое моделирование при оценке надежности средств защиты персонала

В системотехническом методе оценки надежности человеко-машинных систем человек представляется в виде компонента системы, для которого применимы понятия надежности и отказа.

На практике имеют место случаи несоответствия условий труда санитарно-гигиеническим требованиям. При этом даже незначительные по величине воздействия вредных факторов производства могут накапливаться, что в конечном счете может привести к нежелательным результатам. Человек может сохранять работоспособность без заметного ущерба здоровью при воздействии на него вредных факторов, значения которых превышают санитарно-гигиенические нормативы, в течение некоторого времени. Предельно допустимая длительность таких воздействий определяется их мощностью, поглощенной дозой и индивидуальными свойствами сопротивляемости организма работника.

1.5.1. Описание модели

Если на работников в рабочей зоне постоянно действуют вредные факторы производственной среды, то безопасность здоровья персонала будет обеспечена только в случае, когда суммарная продолжительность его работы $\tau(t)$ не превысит времени $\tau_{сз}$ — то есть времени, в течение которого средства защиты гарантированно сохраняют свои защитные свойства. Математически данное условие можно описать неравенством:

$$\tau(t) = \sum_{k=1}^m \tau_k(t) \leq \tau_{сз}, \quad (1.5.1)$$

где m — количество случаев появления работника в зоне действия вредного фактора, от которого он защищен имеющимися у него средствами защиты; $\tau_k(t)$ — продолжительность работы персонала в k -м конкретном случае.

В случае эпизодического характера и случайной длительности времени t пребывания работника в зоне действия вредных факторов безопасность его обеспечивается своевременным использованием средств защиты, что эквивалентно таким соотношениям:

$$\tau_k(t) \leq \tau_h, \quad k \in \{1, 2, \dots, m(t)\}, \quad (1.5.2)$$

где $m(t)$ — число случаев воздействия вредного фактора на работника, не использующего защитные средства; τ_h — временной предел переносимости работником вредного фактора данной интенсивности.

Качественный анализ зависимостей (1.5.1) или (1.5.2) показывает, что условия поражения персонала, обладающего средствами защиты, не противоречат реальным данным заболеваемости на производстве. То есть данные соотношения могут использоваться при оценке безопасности работы человека на вредном производстве. Эти же два ус-

ловия применимы для обоснования требований к создаваемым средствам защиты персонала от действия вредных факторов.

При эпизодическом характере попадания работника в зону действия вредных факторов и случайном времени $\tau(t)$ их действия модель поражения здоровья человека вследствие отказа средства защиты может быть представлена в виде случайного процесса утраты этим средством своих защитных свойств. Это означает, что каждое воздействие вредных факторов в определенные моменты времени $t_1 = \tau_1$, $t_2 = \tau_1 + \tau_2$, $t_3 = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$ может сопровождаться соответствующим этим факторам повреждением средств защиты и человека:

$$\delta_1 = K_{3C}\tau_1(t_1); \quad \delta_2 = K_{3C}\tau_2(t_2); \quad \delta_k = K_{3C}\tau_k(t_k), \quad (1.5.3)$$

где τ_1, τ_2, τ_3 — случайные интервалы между моментами $t_1, t_2, t_3, \dots, t_k$ воздействия вредного фактора на средство защиты; K_{3C} — коэффициент, описывающий скорость утраты защитных свойств при данном уровне действия вредного фактора; $\tau_1(t_1), \tau_2(t_2), \dots, \tau_i(t_i), \dots, \tau_k(t_k)$ — случайные длительности действия вредного фактора на средство защиты в конкретные моменты времени.

Если предположить, что средство защиты аддитивно теряет свои защитные средства от воздействия на него вредного фактора, то стойкость средства защиты может быть представлена величиной накопленных в нем повреждений за календарное время t :

$$\Delta = \sum_{i=1}^m \delta_i = K_{3C} \sum_{i=1}^m \tau_i(t_i), \quad (1.5.4)$$

где m — число случаев воздействия рассматриваемого вредного фактора на средство защиты.

1.5.2. Расчет параметров средств защиты персонала от опасных и вредных производственных факторов

В соответствии с известной в теории вероятностей центральной предельной теоремой [4] сумма m случайных величин X_i ($i = 1 \dots m$) при достаточно большом m приближенно распределена по нормальному закону. Говорят, что при $m \rightarrow \infty$ случайная величина $\sum_{i=1}^m X_i$ асимптотически нормальна.

В нашем случае предположение об аддитивном характере потери защитным средством стойкости из-за вредного воздействия конкрет-

ного производственного фактора [11] соответствует условиям данной теоремы. Это означает, что независимо от закона распределения $\tau(t)$ и δ их сумма Δ и величина суммарного времени $\tau(t)$ работы средств защиты будут распределены по нормальному закону при достаточно больших m (практически уже при $m \geq 5 \dots 6$). Для простоты принимаем $K_{3C} = 1$.

Пусть M_τ — математическое ожидание интервала времени между отдельными воздействиями вредного фактора на средство защиты, M_Δ — математическое ожидание величины вызванного этим фактором повреждения, тогда математическое ожидание числа случаев воздействия рассматриваемого вредного фактора $M[m]$ и математическое ожидание величины суммарного времени работы средств защиты $M[\tau]$ можно выразить следующим образом [4]:

$$M[m] \approx t / M_\tau, \quad M[\tau] \approx t \cdot M_\Delta / M_\tau, \quad (1.5.5)$$

где t — календарное время работы средств защиты.

В предположении, что $K_{3C} = 1$ из формулы (1.5.4) следует: $\Delta = \sum_{i=1}^m \tau_i(t_i)$.

Дисперсии величин Δ и $\tau(t)$ $D[m]$ и $D[\tau]$ будут выражены следующими зависимостями (1.5.4):

$$D[\tau] = \left(\frac{\partial M[\tau]}{\partial M_\Delta} \right)^2 \cdot D_\Delta + \left(\frac{\partial M[\tau]}{\partial M_\tau} \right)^2 \cdot D_\tau \approx \frac{t^2}{M_\tau^2} M_\Delta^2 \left(\frac{D_\tau}{M_\tau^2} + \frac{D_\Delta}{M_\Delta^2} \right), \quad (1.5.6)$$

где D_τ , D_Δ — дисперсии случайных величин интервалов времени между отдельными действиями вредного фактора на средство защиты и вызванного этим действием повреждения.

При решении практических задач истинные значения параметров M_τ , M_Δ , D_τ , D_Δ заменяют их оценками, найденными путем обработки статистических данных опытной эксплуатации средств защиты.

$$\widehat{M}_\tau = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i; \quad \widehat{M}_\Delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i(t_i), \quad (1.5.7)$$

$$\widehat{D}_\tau = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\tau_i - \widehat{M}_\tau)^2; \quad \widehat{D}_\Delta = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\tau_i - \widehat{M}_\Delta)^2. \quad (1.5.8)$$

Так как условием надежности работы средств защиты является выполнение неравенства (1.5.2), то показателем безопасности для использующего данное средство защиты человека может быть принята **вероятность работоспособности средства защиты**:

$$P_{\delta}(\tau) = F[\tau(t) \leq \tau_{3C}] \quad (1.5.9)$$

или **вероятность возникновения отказа средства защиты**, а значит, и поражения по этой причине здоровья человека вредным фактором:

$$Q(\tau) = 1 - P_{\delta}(\tau) = 1 - F[\tau(t) \leq \tau_{3C}]. \quad (1.5.10)$$

Вероятностный показатель определяется с помощью функции Лапласа:

$$P_{\delta}(\tau) = \frac{1}{2} - \Phi_0 \left[\frac{M[\tau] - \tau_{3C}}{\sqrt{D[\tau]}} \right], \quad (1.5.11)$$

где $\Phi_0(z)$ — функция Лапласа, определяемая по табл. П.1 (см. приложение); $z = \frac{M[\tau] - \tau_{3C}}{\sqrt{D[\tau]}}$ — аргумент функции Лапласа.

С помощью описанной модели можно решить следующие задачи.

По формуле (1.5.10) можно оценить вероятность безопасной работы персонала, учитывая применение им различных средств защиты в том случае, если известны параметры M_{τ} , M_{Δ} , D_{τ} , D_{Δ} , τ , τ_{3C} .

Задавая известные значения M_{τ} , M_{Δ} , D_{τ} , D_{Δ} и величину $P_{\delta}(\tau) = \gamma$, можно определить такое время τ_{3C} , для которого с определенной вероятностью γ гарантируется безотказность средств защиты. Гарантийная наработка средства защиты может быть рассчитана по формуле:

$$\tau_{3C} = M[\tau] - \arg \left[\Phi_0 = \left(\frac{1}{2} - \gamma \right) \right] \sqrt{D[\tau]} = \tau_{3C}^{(\gamma)}, \quad (1.5.12)$$

где $\arg \left[\Phi_0 = \left(\frac{1}{2} - \gamma \right) \right]$ — аргумент функции Лапласа.

В данном случае необходимо решить обратную задачу: по известному значению функции Φ_0 с помощью табл. П.1 найти аргумент, после чего определить $\tau_{3C}^{(\gamma)}$ — так называемый гамма-процентный гарантийный ресурс защитных средств по наработке на отказ.

Для того, чтобы найти ресурс времени T_{γ} работы защитных средств, который с вероятностью γ обеспечивает безотказность средства защиты при заданных параметрах M_{τ} , M_{Δ} , D_{τ} , D_{Δ} , где $\gamma = P_{\delta}(\tau)$ — доверительная вероятность безотказной работы средства защиты в течение вре-

мени гарантийной наработки, необходимо в формулах (1.5.5) и (1.5.6) для определения значений $M[\tau]$ и $D[\tau]$ заменить t на T_γ и подставить в уравнение (1.5.11). Затем найти по табл. П.1 аргумент функции $\Phi_0(z) = \left(\frac{1}{2} - \gamma\right)$, после чего решить полученное уравнение относительно T_γ . После всех этих подстановок и замен выражение для расчета гарантийного срока службы средства защиты будет выглядеть следующим образом:

$$T_\gamma = \frac{\tau_{3C} \frac{\widehat{M}_\tau}{\widehat{M}_\Delta}}{1 - \sqrt{\left(\frac{\widehat{D}_\tau}{\widehat{M}_\tau^2} + \frac{\widehat{D}_\Delta}{\widehat{M}_\Delta^2}\right) \arg\left[\Phi_0 = \left(\frac{1}{2} - \gamma\right)\right]}}. \quad (1.5.13)$$

1.5.3. Примеры и задачи по расчету параметров СИЗ

Пример 1.5.1. Определить значение показателя безопасности использования респираторов в течение календарного месяца на основе данных, полученных в процессе испытаний их опытной партии. Величина $\tau_{3C} = 11,5$ ч. Ресурсные испытания СИЗ показали следующие данные:

| Время, ч | Номер испытаний | | | | | | | | | | |
|-------------|-----------------|------|-----|-----|------|------|-----|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| τ_i | 5 | 12 | 9 | 20 | 17 | 11 | 14 | 10 | 13 | 21 | 8 |
| $\tau_i(t)$ | 0,23 | 0,15 | 0,3 | 0,1 | 0,26 | 0,18 | 0,2 | 0,16 | 0,12 | 0,22 | 0,14 |

По формулам (1.5.7) и (1.5.8) находим оценки параметров M_τ , M_Δ (математические ожидания интервала времени между отдельными воздействиями вредного фактора на СИЗ и величины вызванного им повреждения) и D_τ , D_Δ — дисперсии оценок соответствующих случайных величин.

$$\begin{aligned} \widehat{M}_\tau &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i = \frac{5+12+9+20+17+11+14+10+13+21+8}{11} = 12,73; \\ \widehat{M}_\Delta &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i(t) = \\ &= \frac{0,23+0,15+0,3+0,1+0,26+0,18+0,2+0,16+0,12+0,22+0,14}{11} = 0,1872; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\widehat{D}_\tau &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\tau_i - \widehat{M}_\tau)^2 = \\ &= \frac{59,75 + 0,53 + 13,91 + 52,85 + 18,23 + 2,99 + 1,61 + 7,45 + 0,0729 + 68,39 + 22,37}{10} = 24,81; \\ \widehat{D}_\Delta &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\tau_i(t) - \widehat{M}_\Delta)^2 = \frac{0,0018 + 0,0014 + 0,013 + 0,0076 + 0,0053 + 0,00005}{10} + \\ &+ \frac{0,00016 + 0,00073 + 0,0045 + 0,0011 + 0,0022}{10} = 0,0038.\end{aligned}$$

По формулам (1.5.5) и (1.5.6) находим математическое ожидание случайных величин Δ и $\tau(t) - M[m]$, $M[\tau]$ и их дисперсии $D[m]$, $D[\tau]$:

$$M[m] = \frac{t}{\widehat{M}_\tau} = \frac{720}{12,73} = 56,56;$$

$$M[\tau] = \frac{t \widehat{M}_\Delta}{\widehat{M}_\tau} = \frac{720 \cdot 0,1872}{12,73} = 10,58;$$

$$D[m] \approx \frac{t^2}{M^4} D_\tau = \frac{720^2}{12,73^4} \cdot 24,81 = 489,75;$$

$$D[\tau] = \frac{t^2}{\widehat{M}_\tau^2} \widehat{M}_\Delta^2 \left(\frac{\widehat{D}_\tau}{\widehat{M}_\tau^2} + \frac{\widehat{D}_\Delta}{\widehat{M}_\Delta^2} \right) = \frac{720^2 \cdot 0,1872^2}{12,73^2} \left(\frac{24,81}{12,73^2} + \frac{0,0038}{0,1872^2} \right) = 29,32.$$

По формуле (1.5.11) определяем показатель безопасности использования респираторов P_δ . Значение функции Лапласа определяем по табл. П.1.

Вычисляем аргумент функции Лапласа:

$$z = \left[\frac{M[\tau] - \tau_{3C}}{\sqrt{D[\tau]}} \right] = \left[\frac{10,58 - 11,5}{\sqrt{29,32}} \right] = -0,1699;$$

$$P_\delta(\tau) = \frac{1}{2} - \Phi_0 \left[\frac{(M[\tau] - \tau_{3C})}{\sqrt{D[\tau]}} \right] = \frac{1}{2} - \Phi_0(-0,1699) = \frac{1}{2} - (-0,1900) = 0,690,$$

$$P_\sigma = 0,69 = 69\%.$$

Показатель отказа средств защиты $Q(\tau) = 1 - P_\sigma(\tau) = 0,69 = 31\%$.

Вывод: при заданных условиях вероятность безотказной работы респиратора в течение календарного месяца составляет 69%.

Пример 1.5.2. Определить гарантийную наработку безотказности средств защиты τ_{3C} , значение которой с доверительной вероятностью

$\gamma = 0,99$ обеспечивало бы безопасность персонала в течение календарного месяца ($t = 720$ ч).

Вычисляем значение функции Лапласа для $\gamma = 0,99$:

$$\Phi_0 = \left(\frac{1}{2} - \gamma \right) = \frac{1}{2} - 0,99 = -0,49.$$

По табл. П.1 определяем значение аргумента функции Лапласа $\Phi_0 = -0,49$:

$$\arg[\Phi_0 = -0,49] = -0,466.$$

По формуле (1.5.11) определяем $\tau_{3C}^{(\gamma)}$ — гамма-процентный гарантийный ресурс защитных средств по наработке на отказ:

$$\tau_{3C}^{(\gamma)} = M[\tau] - \arg\left[\Phi_0 = \left(\frac{1}{2} - \gamma\right)\right] \sqrt{D[\tau]} = 10,58 - (-0,466) \sqrt{29,32} = 13,10 \text{ ч.}$$

Вывод: чтобы с доверительной вероятностью $\gamma = 0,99$ обеспечить безопасность персонала в течение календарного месяца, исследуемый респиратор должен выдерживать 13,10 ч непрерывной работы в условиях воздействия вредного фактора.

Пример 1.5.3. Определить гарантийный срок службы T_γ средств защиты в условиях воздействия вредных производственных факторов при значении доверительной вероятности безотказной работы средств защиты $\gamma = 0,9$ при времени гарантийной наработки $\tau_{3C} = 11,5$ ч.

Вычисляем значение функции Лапласа для $\gamma = 0,9$:

$$\Phi_0 = \left(\frac{1}{2} - \gamma \right) = \frac{1}{2} - 0,9 = -0,4.$$

По табл. П.1 определяем значение аргумента функции Лапласа $\Phi_0 = -0,4$:

$$\arg[\Phi_0 = -0,4] = -0,371.$$

По формуле (1.5.13) определяем значение T_γ :

$$\begin{aligned} T_\gamma &= \frac{\tau_{3C} \frac{\widehat{M}_\tau}{\widehat{M}_\Delta}}{1 - \sqrt{\left(\frac{\widehat{M}_\tau}{\widehat{M}_\tau^2} + \frac{\widehat{D}_\Delta}{\widehat{M}_\Delta^2} \right) \arg\left[\Phi_0 = \left(\frac{1}{2} - \gamma\right)\right]}} = \frac{11,5 \cdot \frac{12,73}{0,1872}}{1 - \sqrt{\left(\frac{24,81}{12,73^2} + \frac{0,0038}{0,1872^2} \right) (-0,371)}} = \\ &= 676,2 \text{ ч} \approx 28 \text{ сут.} \end{aligned}$$

Вывод: респиратор, выдерживающий 11,5 часов непрерывного воздействия вредного фактора, в данных условиях эксплуатации может с вероятностью $\gamma = 0,9$ эксплуатироваться в течение 28 суток.

Постановка задачи для расчетов. Провести исследование вероятности поражения работников опасными и вредными факторами производственного процесса при условии использования ими средств защиты. В качестве средства защиты рассмотрим респираторные устройства, предназначенные для очистки воздуха рабочей зоны от вредных примесей.

Задача 1.5.1. Определить значение показателя безопасности $P_8(\tau)$ использования респираторов в течение календарного месяца на основе данных, полученных в процессе испытаний их опытной партии. Исходные данные для расчета приведены в табл. 7.

Задача 1.5.2. Определить гарантийную наработку безотказности средств защиты τ_{3C} , значение которой с доверительной вероятностью $\gamma = 0,99$ обеспечивало бы безопасность персонала в течение календарного месяца ($t = 720$ ч). Исходные данные для расчета приведены в табл. 7.

Задача 1.5.3. Определить гарантийный срок службы T_γ средств защиты в условиях воздействия вредных производственных факторов при заданном значении доверительной вероятности γ безотказной работы средств защиты в течение заданного времени гарантийной наработки τ_{3C} . Исходные данные для расчета приведены в табл. 7.

Таблица 7

Исходные данные для задач раздела 1.5.2

| Вариант 1 | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| Время, ч | Номер испытаний | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| τ_i | 11 | 13 | 8 | 6 | 10 | 5 | 14 | 20 | 19 | 12 | 9 |
| $\tau_i(t)$ | 0,3 | 0,17 | 0,14 | 0,33 | 0,2 | 0,3 | 0,1 | 0,23 | 0,18 | 0,13 | 0,28 |
| $\tau_{3C} = 11$ ч; $t = 720$ ч; $\gamma = 0,9$ | | | | | | | | | | | |
| Вариант 2 | | | | | | | | | | | |
| Время, ч | Номер испытаний | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| τ_i | 6 | 12 | 18 | 15 | 9 | 5 | 11 | 21 | 14 | 20 | 7 |
| $\tau_i(t)$ | 0,25 | 0,17 | 0,32 | 0,24 | 0,1 | 0,11 | 0,23 | 0,3 | 0,19 | 0,2 | 0,14 |
| $\tau_{3C} = 11,5$ ч; $t = 720$ ч; $\gamma = 0,95$ | | | | | | | | | | | |

Продолжение табл. 7

| Вариант 3 | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Время, ч | Номер испытаний | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| τ_i | 9 | 15 | 13 | 18 | 20 | 8 | 12 | 16 | 20 | 17 | 11 |
| $\tau_i(t)$ | 0,2 | 0,16 | 0,2 | 0,22 | 0,14 | 0,1 | 0,3 | 0,26 | 0,1 | 0,18 | 0,11 |
| $\tau_{3C} = 10,5 \text{ ч}; t = 720 \text{ ч}; \gamma = 0,92$ | | | | | | | | | | | |
| Вариант 4 | | | | | | | | | | | |
| Вре- мя, ч | Номер испытаний | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| τ_i | 5 | 12 | 9 | 20 | 17 | 11 | 14 | 10 | 13 | 21 | 8 |
| $\tau_i(t)$ | 0,23 | 0,15 | 0,3 | 0,1 | 0,26 | 0,18 | 0,2 | 0,16 | 0,12 | 0,22 | 0,14 |
| $\tau_{3C} = 10,5 \text{ ч}; t = 720 \text{ ч}; \gamma = 0,85$ | | | | | | | | | | | |
| Вариант 5 | | | | | | | | | | | |
| Вре- мя, ч | Номер испытаний | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| τ_i | 7 | 11 | 17 | 9 | 13 | 20 | 8 | 15 | 21 | 6 | 12 |
| $\tau_i(t)$ | 0,5 | 0,3 | 0,11 | 0,24 | 0,42 | 0,31 | 0,16 | 0,28 | 0,17 | 0,09 | 0,1 |
| $\tau_{3C} = 10 \text{ ч}; t = 720 \text{ ч}; \gamma = 0,9$ | | | | | | | | | | | |
| Вариант 6 | | | | | | | | | | | |
| Вре- мя, ч | Номер испытаний | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| τ_i | 7 | 10 | 18 | 6 | 8 | 15 | 19 | 12 | 21 | 15 | 10 |
| $\tau_i(t)$ | 0,3 | 0,17 | 0,35 | 0,15 | 0,21 | 0,19 | 0,12 | 0,31 | 0,19 | 0,20 | 0,10 |
| $\tau_{3C} = 11 \text{ ч}; t = 720 \text{ ч}; \gamma = 0,9$ | | | | | | | | | | | |
| Вариант 7 | | | | | | | | | | | |
| Время, ч | Номер испытаний | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| τ_i | 8 | 14 | 10 | 7 | 15 | 13 | 9 | 20 | 18 | 12 | 19 |
| $\tau_i(t)$ | 0,21 | 0,17 | 0,30 | 0,42 | 0,09 | 0,16 | 0,28 | 0,1 | 0,4 | 0,15 | 0,2 |
| $\tau_{3C} = 11,5 \text{ ч}; t = 720 \text{ ч}; \gamma = 0,95$ | | | | | | | | | | | |
| Вариант 8 | | | | | | | | | | | |
| Время, ч | Номер испытаний | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| τ_i | 8 | 14 | 9 | 5 | 7 | 16 | 21 | 13 | 18 | 23 | 6 |
| $\tau_i(t)$ | 0,1 | 0,19 | 0,40 | 0,33 | 0,21 | 0,17 | 0,30 | 0,15 | 0,20 | 0,10 | 0,51 |
| $\tau_{3C} = 11 \text{ ч}; t = 720 \text{ ч}; \gamma = 0,90$ | | | | | | | | | | | |

Продолжение табл. 7

| Вариант 9 | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Время, ч | Номер испытаний | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| τ_i | 10 | 8 | 5 | 15 | 7 | 20 | 11 | 10 | 19 | 16 | 9 |
| $\tau_i(t)$ | 0,60 | 0,20 | 0,50 | 0,38 | 0,25 | 0,15 | 0,10 | 0,23 | 0,30 | 0,17 | 0,27 |
| $\tau_{3C} = 13,5 \text{ ч}; t = 720 \text{ ч}; \gamma = 0,90$ | | | | | | | | | | | |
| Вариант 10 | | | | | | | | | | | |
| Время, ч | Номер испытаний | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| τ_i | 4 | 14 | 7 | 19 | 18 | 13 | 10 | 12 | 15 | 22 | 9 |
| $\tau_i(t)$ | 0,12 | 0,24 | 0,26 | 0,10 | 0,30 | 0,18 | 0,15 | 0,14 | 0,16 | 0,23 | 0,26 |
| $\tau_{3C} = 13 \text{ ч}; t = 720 \text{ ч}; \gamma = 0,9$ | | | | | | | | | | | |
| Вариант 11 | | | | | | | | | | | |
| Время, ч | Номер испытаний | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| τ_i | 6 | 10 | 8 | 18 | 15 | 9 | 13 | 9 | 15 | 18 | 7 |
| $\tau_i(t)$ | 0,2 | 0,13 | 0,20 | 0,30 | 0,25 | 0,19 | 0,30 | 0,16 | 0,13 | 0,21 | 0,15 |
| $\tau_{3C} = 11 \text{ ч}; t = 720 \text{ ч}; \gamma = 0,9$ | | | | | | | | | | | |
| Вариант 12 | | | | | | | | | | | |
| Время, ч | Номер испытаний | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| τ_i | 7 | 12 | 14 | 5 | 20 | 6 | 18 | 9 | 21 | 13 | 10 |
| $\tau_i(t)$ | 0,25 | 0,17 | 0,09 | 0,30 | 0,30 | 0,12 | 0,19 | 0,20 | 0,16 | 0,45 | 0,10 |
| $\tau_{3C} = 11,5 \text{ ч}; t = 720 \text{ ч}; \gamma = 0,9$ | | | | | | | | | | | |
| Вариант 13 | | | | | | | | | | | |
| Время, ч | Номер испытаний | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| τ_i | 11 | 8 | 12 | 15 | 17 | 10 | 9 | 11 | 14 | 9 | 17 |
| $\tau_i(t)$ | 0,15 | 0,20 | 0,16 | 0,19 | 0,10 | 0,24 | 0,13 | 0,30 | 0,16 | 0,21 | 0,12 |
| $\tau_{3C} = 11,5 \text{ ч}; t = 720 \text{ ч}; \gamma = 0,90$ | | | | | | | | | | | |
| Вариант 14 | | | | | | | | | | | |
| Время, ч | Номер испытаний | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| τ_i | 7 | 10 | 14 | 13 | 9 | 20 | 19 | 18 | 15 | 13 | 12 |
| $\tau_i(t)$ | 0,18 | 0,14 | 0,10 | 0,15 | 0,13 | 0,23 | 0,20 | 0,21 | 0,22 | 0,26 | 0,30 |
| $\tau_{3C} = 11,5 \text{ ч}; t = 720 \text{ ч}; \gamma = 0,90$ | | | | | | | | | | | |

Окончание табл. 7

| Вариант 15 | | | | | | | | | | | |
|--|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Время, ч | Номер испытаний | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| τ_i | 7 | 8 | 13 | 16 | 15 | 8 | 7 | 20 | 16 | 15 | 19 |
| $\tau_i(t)$ | 0,28 | 0,15 | 0,33 | 0,23 | 0,20 | 0,13 | 0,24 | 0,40 | 0,21 | 0,30 | 0,16 |
| $\tau_{3C} = 11,5 \text{ ч}; t = 720 \text{ ч}; \gamma = 0,9$ | | | | | | | | | | | |
| Вариант 16 | | | | | | | | | | | |
| Время, ч | Номер испытаний | | | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| τ_i | 10 | 16 | 14 | 19 | 20 | 10 | 10 | 17 | 21 | 10 | 15 |
| $\tau_i(t)$ | 0,20 | 0,16 | 0,20 | 0,15 | 0,13 | 0,10 | 0,13 | 0,20 | 0,10 | 0,20 | 0,10 |
| $\tau_{3C} = 10,5 \text{ ч}; t = 720 \text{ ч}; \gamma = 0,85$ | | | | | | | | | | | |

Вопросы

1. Что такое риск и какие бывают виды риска?
2. Что такое система и какими свойствами она обладает?
3. Дайте определение надежности. Как это понятие соотносится с понятием вероятности отказа?
4. Охарактеризуйте методы анализа безопасности систем.
5. В чем сходство и в чем различие понятий «дерево причин и опасностей», «дерево отказов», «дерево событий»?
6. Какие методы используются для определения надежности энергоснабжения крупных технологических объектов?
7. Как определить число резервных агрегатов, необходимых для надежного энергоснабжения?
8. Какие подходы и принципы используются для определения надежности средств защиты работников от действия опасных и вредных факторов?

ГЛАВА 2. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ БЖД

2.1. Гигиеническое нормирование вредных веществ

2.1.1. Допустимые концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе

Основными нормативами, показывающими качество воздушной среды в федеральном законе «Об охране атмосферного воздуха», являются предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ, которые количественно определяют, какое содержание вредных веществ в атмосферном воздухе не оказывает ни прямого, ни косвенного вредного воздействия на человека и окружающую среду.

Под прямым воздействием понимают временное негативное раздражение организма или патологические изменения в организме при накопления в нем вредных веществ выше определенной дозы.

Косвенное воздействие вредных веществ вызывает такое изменение в окружающей среде, которое, не оказывая непосредственного вредного влияния на организм, ухудшает условия его жизнедеятельности (например: увеличивает число туманных дней, поражает почву и зеленые насаждения кислотным дождем и т. п.).

Предельно допустимая концентрация (ПДК) — это максимальная концентрация вредных веществ в атмосфере, отнесенная к определенному времени осреднения, которая при периодическом или постоянном воздействии на протяжении всей жизни организма не оказывает вредного воздействия на его здоровье, включая воздействие на его потомство, а также на окружающую природную среду [12].

Значения ПДК вредных веществ обосновываются длительными клиническими и санитарно-гигиеническими исследованиями и носят законодательный характер на территории Российской Федерации.

Для определения значений ПДК проводят испытания на подопытных животных для определения токсического предела влияния вещества. В отдельных случаях, например, для обнаружения порога восприятия запаха, проводят испытания на людях. Такая пороговая концентрация устанавливается на основе негативной реакции у наиболее восприимчивых людей.

После определения порога влияния или порога восприятия устанавливаются нормативные величины ПДК, они понижаются по отношению к пороговым величинам обычно с двукратным запасом. Вследствие этого двукратное превышение санитарных норм приземных концентраций вредных веществ в воздухе, как правило, не влияет на рост числа заболеваний у населения.

В отдельных случаях, для особо опасных веществ, ПДК устанавливают с большим запасом по отношению к выявленной пороговой величине. Так, например, при установлении ПДК для бенз(а)пирена, канцерогенного чрезвычайно опасного вредного вещества, был принят десятикратный запас по его предельной концентрации.

ПДК вредных веществ в атмосферном воздухе не являются международным стандартом и их значения могут значительно различаться в разных странах. Это также зависит и от методов их определения и спецификации. В Российской Федерации ПДК соответствуют самым низким значениям, которые рекомендованы ВОЗ.

Для веществ, которые оказывают немедленное остроотравляющее или раздражающее действие, устанавливают **максимальные разовые** предельно допустимые концентрации ($\text{ПДК}_{\text{мр}}$), их контроль проводят за 20-минутный период.

Вещества, оказывающие медленное воздействие на организм, накопление которого приводит к постепенному и незаметному разрушению здоровья, например вещества общетоксического, канцерогенного, фиброгенного действия, контролируются с использованием среднесуточных предельно допустимых концентраций ($\text{ПДК}_{\text{ср}}$). В этом случае не так важны скачки концентрации данного вещества в течение кратких промежутков времени, главное, чтобы средняя концентрация его в течение суток не превышала нормативное значение.

Ряд веществ, обладающих немедленным раздражающим действием, в более низких концентрациях может также вызывать медленные патологические изменения и накопление их в организме. Поэтому для данного класса веществ устанавливают как ПДК_{мр}, так и ПДК_{сс}. При этом, как правило, порог разового раздражающего воздействия вещества на организм больше порога токсического медленного воздействия. Соответственно, для такого вещества устанавливаются различные величины ПДК_{мр} и ПДК_{сс}. Например, для оксида углерода ПДК_{мр} = 5 мг/м³, а ПДК_{сс} = 3 мг/м³.

В населенных пунктах и на промышленных площадках при проектировании новых производств и предприятий необходимо учитывать фоновые концентрации вредных веществ. Атмосферный воздух в таких местах обычно уже загрязнен выбросами от ранее построенных предприятий и других источников. Содержание таких загрязнений рассматривается в качестве фоновой концентрации. В этом случае новый проектируемый объект должен удовлетворять следующему требованию:

$$c \leq \text{ПДК} - c_{\text{ф}},$$

где c — концентрация вредного вещества; $c_{\text{ф}}$ — фоновая концентрация этого вредного вещества в атмосферном воздухе населенного пункта.

Нормативы ПДК вредных веществ в атмосфере воздуха едины для всей территории РФ. В отдельных случаях (для особо охраняемых территорий, санаториев, курортных зон и районов с высокой концентрацией производств) устанавливаются более строгие нормативы ПДК загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Например, для зон санитарной охраны курортов и мест размещения крупных санаториев, а также некоторых зон отдыха ПДК установлена на 20 % меньше, чем для жилых районов.

Действующие нормативные акты, устанавливающие ПДК вредных веществ в воздухе, постоянно дополняются. Но в отдельных случаях при составлении проектной документации на новый производственный объект требуется разрабатывать нормативы **предельно допустимых выбросов (ПДВ)** по загрязняющим веществам, не включенным в перечень ПДК. В таких случаях по договору с заказчиком санитарно-гигиенические институты Минздрава РФ разрабатывают для требуемого вредного вещества временный норматив — **ориентировочный безопасный уровень воздействия (ОБУВ)**. Данный норматив определяется расчетным путем по известным эмпирическим зависимостям и проверяется на веществах с похожими свойствами, для которых ПДК уже

установлены. Нормативы ОБУВ вводятся отдельным документом и, как правило, устанавливаются сроком на три года.

2.1.2. Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны

В законодательстве Российской Федерации введены разные нормативы концентраций вредных веществ для воздуха рабочей зоны ($\text{ПДК}_{\text{рз}}$) и для атмосферы воздуха ($\text{ПДК}_{\text{ав}}$) жилой застройки (рис. 10).

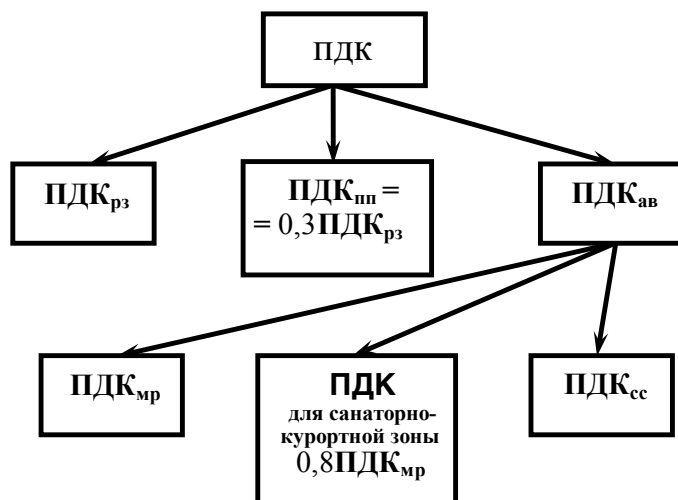


Рис. 10. Раздельное нормирование загрязнений

Предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны ($\text{ПДК}_{\text{рз}}$) — это такая концентрация вредного вещества в воздухе, которая при ежедневном, кроме выходных дней, и постоянном вдыхании в течение рабочей смены (8 часов или другая продолжительность, но не более 40 часов в неделю) за все время рабочего стажа **не может вызывать заболевания** или изменения состояния здоровья, которые можно обнаружить современными методами исследования, в настоящее время или в отдаленные сроки настоящего и последующих поколений.

Допустимая концентрация вредного вещества в воздухе рабочей зоны ($\text{ПДК}_{\text{рз}}$) обычно значительно больше, чем $\text{ПДК}_{\text{ав}}$ для атмосферы воздуха населенных мест. То есть к составу воздуха для рабочей зоны гигиенические требования менее жесткие из-за меньшего времени нахождения человека в рабочей зоне по сравнению с жилой зоной.

Для территории заводских площадок ПДК не разрабатывались, но в соответствии с СП 2.2.1.1312–03 в местах забора воздуха систем

вентиляции концентрации вредных веществ не должны превышать 30 % от ПДК_{рз}. Поскольку воздух в большинство помещений поступает через окна и другие аэрационные проемы, эта величина условно принимается в качестве ПДК для заводской территории (промышленной площадки — ПДК_{пн}).

В настоящее время все применяемые для атмосферы воздуха виды ПДК представлены на рис. 10.

2.1.3. Комбинированное действие вредных веществ на здоровье человека

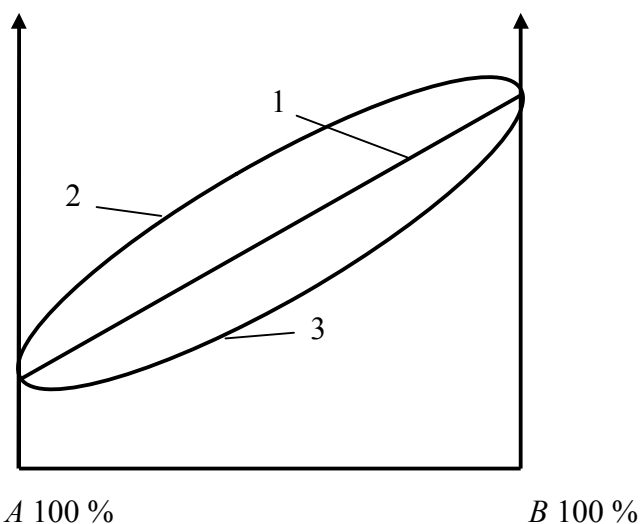


Рис. 11. Характеристики эффекта воздействия вредного вещества на организм человека

На современном производстве в рабочую зону выделяются десятки различных химических веществ. Некоторые вещества, взаимодействуя друг с другом, совместно могут оказывать комбинированное воздействие на состояние организма человека.

В настоящее время принято выделять три возможных эффекта комбинированного воздействия (см. рис. 11):

- 1) суммация (аддитивное влияние) выражается в суммировании взаимных эффектов, индуцированных комбинированным действием;
- 2) потенцирование (синергизм) — кратное усиление эффекта воздействия, превышает простую сумму вредного влияния;
- 3) антагонизм: эффект воздействия меньше, чем ожидается при суммеции вредных эффектов.

2.1.4. Степени опасности вредных веществ по ГОСТ

ГОСТ 12.1.007–76 «ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности» классифицирует все вредные вещества по степени их воздействия на организм человека. Выделены четыре класса опасности вредных веществ (табл. 8):

- 1-й класс — чрезвычайно опасные;
- 2-й класс — высоко опасные;
- 3-й класс — умеренно опасные;
- 4-й класс — малоопасные.

Таблица 8

Классы опасности вредных веществ

| Наименование показателей | Классы опасности | | | |
|---|-----------------------------------|--|--------------------------|-----------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Предельно допустимая концентрация (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны, мг/м ³ | менее 0,1 | 0,1 ...1,0 | 1,0 ...10,0 | более 10,0 |
| Средняя смертельная концентрация в воздухе, мг/м ³ | менее 500 | 500–5000 | 5001–50000 | более 50000 |
| Примеры веществ | Be, Hg, HCN, Ni, Pb, то-рий, озон | H ₂ S, Sb, H ₂ SO ₄ , Cl, NaOH, нитроформ | Стирол, спирт ме-тиловый | Спирт эти-ловый, СО, бензин |

2.1.5. Санитарно-защитные зоны (СЗЗ)

Санитарно-защитная зона — обязательный элемент любого объекта, который является источником воздействия на среду обитания и здоровье человека. Санитарно-защитная зона утверждается в установленном порядке в соответствии с законодательством Российской Федерации при наличии санитарно-эпидемиологического заключения о соответствии санитарным нормам и правилам.

Ширина санитарно-защитной зоны устанавливается с учетом санитарной классификации, результатов расчетов ожидаемого загрязнения атмосферного воздуха и уровней физических воздействий, а для действующих предприятий — и натурных исследований.

Территория санитарно-защитной зоны предназначена:

- ◇ для обеспечения снижения уровня воздействия до требуемых гигиенических нормативов по всем факторам воздействия за ее пределами;
- ◇ создания санитарно-защитного барьера между территорией предприятия и территорией жилой застройки;
- ◇ организации дополнительных озелененных площадей, обеспечивающих экранирование, ассимиляцию и фильтрацию загрязнителей атмосферного воздуха и повышение комфортности микроклимата.

В СЗЗ запрещено располагать:

- ◇ жилые объекты;
- ◇ детские дошкольные, школьные и лечебные учреждения;
- ◇ сельхозугодья, выпас скота.

Размер СЗЗ устанавливается в зависимости от класса предприятия в соответствии с СанПин 2.2.1/2.1.1.1200—03. В табл. 9 приведены размеры санитарно-защитных зон в зависимости от санитарной классификации предприятий.

Таблица 9

Классы опасности предприятий

| Наименование показателей | Класс предприятия | | | | |
|--------------------------|---|--|--|--|---|
| | I | II | III | IV | V |
| Вид производства | Производство аммиака, азотных удобрений; металлургические комбинаты; угольные ТЭС | Производство кокса, автомобилей, цемента, антибиотиков; добыча железных руд; газовые ТЭС | Производство пластмасс, метизов, фасонного литья, обуви; ТЭЦ и котельные; добыча нефти, газа | Элеваторы; производство спирта, пряжи и тканей, железобетона; металлороботка | Автомобильные газонаполнительные станции, малые типографии; добыча песка, глины; овощехранилища, склады |
| Размер СЗЗ, м | 1000 | 500 | 300 | 100 | 50 |

2.1.6. Санитарно-гигиенические нормативы как критерии влияния источника воздействия на среду обитания

Вся сфера экологического нормирования и стандартизации, связанная с техногенным загрязнением среды, опирается на гигиенические нормы и использует установленные предельно допустимые concentra-

ции (ПДК). На основании величин ПДК с помощью специальных программ вычисляются значения предельно допустимых эмиссий — **предельно допустимые выбросы** в атмосферу (ПДВ), **предельно допустимый сброс** в водоемы (ПДС) тех или иных веществ, выделяемых конкретными источниками (предприятиями) данной территории. При этом учитываются характеристики источников и условия распространения эмиссий.

Предприятия, независимо от времени ввода их в эксплуатацию, должны быть оснащены сооружениями, оборудованием и аппаратурой для очистки выбросов в атмосферу и средствами контроля за количеством и составом выбрасываемых загрязняющих веществ. При невозможности уменьшения выбросов до установленных нормативов соответствующие предприятия, сооружения и иные объекты закрываются или их профиль подлежит изменению.

При особо неблагоприятных метеорологических условиях (НМУ), способствующих накоплению в нижних слоях атмосферы выбросов, угрожающих здоровью людей, предприятия обязаны перейти на режим с уменьшенным количеством выбросов или в необходимых случаях полностью прекратить работу.

В соответствии с «Методикой расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе», утвержденной приказом Минприроды России от 6 июня 2017 года № 273 [13] не допускается рост выбросов загрязняющих веществ, концентрация которых в атмосферном воздухе превышает ПДК в зоне рассеивания выбросов рассматриваемого предприятия.

Основным средством для соблюдения ПДК для населенных мест является установление для каждого стационарного источника нормативов предельно допустимых выбросов (ПДВ).

Нормативы ПДВ загрязняющих веществ в атмосферу определяются с учетом выбросов загрязняющих веществ от всех других источников в данном районе и перспектив развития этих предприятий.

ПДВ устанавливаются в зависимости от местоположения источника выбросов по отношению к жилым районам, условий рассеивания загрязняющих веществ в географическом районе, температуры окружающего воздуха, рельефа местности, условий поступления газов в атмосферу (высота и диаметр трубы, температура и объем газов) и других факторов.

Нормативы ПДВ устанавливаются на основании расчетов приземных концентраций на границе жилой зоны и сопоставления этих результатов с ПДК отдельно для каждого из загрязняющих веществ, содержащегося в выбросах источников.

Нормативы ПДВ рассчитывают при наиболее неблагоприятных метеорологических условиях. Например, для того чтобы в ближайшем к заводским трубам жилом квартале города при наименее благоприятных условиях рассеяния не превышались ПДК определенных загрязнителей, нужно ограничить выброс этих веществ постоянной предельной величиной — ПДВ. Подобная ситуация схематически отображена на рис. 12. ПДВ и ПДС уже непосредственно регламентируют интенсивность и качество технологических процессов, являющихся источником загрязнения, и приобретают свойство экологических нормативов. Сверхнормативные эмиссии влекут за собой экономические и административные санкции.

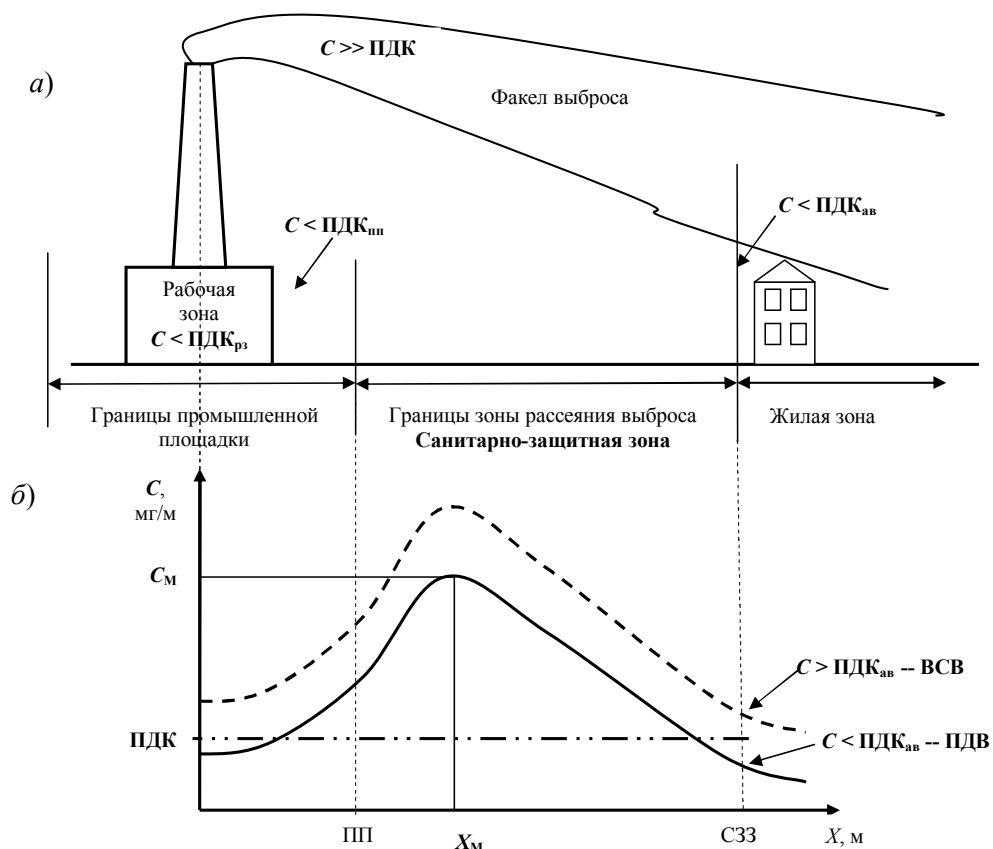


Рис. 12. Схема зоны загрязнения в районе промышленного источника:

а — схема рассеивания выбросов; б — график изменения концентрации загрязняющего вещества C в приземном слое по мере удаления от источника выброса X

Часто бывает, однако, что предприятие по техническим причинам не может соблюдать предписанные ему ПДВ, а сокращение или остановка производства чревата экономическими и социальными коллизиями. В таких случаях применяется практика временного согласования выбросов и стоков на уровне фактических эмиссий (ВСВ и ВСС), что по существу является отказом от нормирования и приводит к ухудшению экологической обстановки.

Допустимость такого выброса согласовывается с органами Минприроды РФ на ограниченный период. В этом случае для достижения ПДВ предусматриваются различные мероприятия, включающие изменение технологии, сырья, топлива, систем очистки газов, высоты выброса и т. п.

Осуществление мероприятий, необходимых для достижения ПДВ, требует значительных капиталовложений. Поэтому величины ВСВ устанавливаются на период, пока эти мероприятия не будут осуществлены.

2.2. Гигиеническая оценка воздушной среды

Для оценки состояния воздушной среды в производственном помещении и загрязнения атмосферного воздуха в жилой зоне, расположенной около данного производственного помещения, необходимо измерить или рассчитать концентрации вредных веществ и сравнить их с ПДК для соответствующих зон нормирования.

Как правило, в реальном производстве в воздух выбрасывается одновременно большой перечень различных вредных веществ.

2.2.1. Расчет рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе

На первом этапе расчета для каждого из выбрасываемых веществ определяется максимально возможная концентрация в приземном слое атмосферного воздуха, C_m , мг/м³ [13] (см. рис. 12, б).

$$C_m = \frac{A \cdot M_i \cdot F \cdot n \cdot \eta}{H^{4/3}} \cdot K, \quad (2.2.1)$$

где M_i — количество выбрасываемого i -го вещества, г/с.

Значения коэффициентов в формуле (2.2.1) и необходимые данные для расчета приведены в табл. 10.

Таблица 10

Данные для расчета рассеивания в атмосфере вредных веществ

| Параметр | Обозначение | Размерность | Значение |
|--|-------------|-------------|----------|
| Высота источника выброса | H | м | 12,5 |
| Коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы | A | — | 160 |
| Коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в воздухе | F | — | 1,0 |
| Коэффициент, учитывающий условия выхода газовой смеси из устья источника выброса | n | — | 1,49 |
| Коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности | η | — | 1,0 |
| Коэффициент, зависящий от скорости выхода газовой смеси | K | — | 0,016 |
| Скорость выхода газовой смеси | ω_0 | м/с | 14,1 |
| Диаметр устья трубы | d | м | 0,71 |
| Санитарно-защитная зона | X | м | 500 |

На втором этапе расчета необходимо определить расстояние X_m — это расстояние от источника выброса, на котором приземная концентрация вредного вещества при неблагоприятных метеорологических условиях достигает максимального значения C_m .

$$X_m = \frac{(5 - F) \cdot \alpha \cdot H}{4}, \quad (2.2.2)$$

где коэффициент α определяется по формулам:

$$\alpha = 11,4 \cdot V_m; \quad (2.2.3)$$

$$V_m = 1,3 \cdot \frac{\omega_0 D}{H}; \quad (2.2.4)$$

ω_0 — скорость выхода газовой смеси, м/с; D — диаметр устья источника выброса, м.

На третьем этапе рассчитываются значения приземной концентрации вредных веществ C в атмосфере вдоль оси факела выброса на расстоянии X от источника выброса:

$$C = S \cdot C_m, \quad (2.2.5)$$

где S — безразмерный коэффициент, определяемый по формуле:

$$S = \frac{1,13}{0,13 \cdot (X/X_m)^2 + 1}, \quad (2.2.6)$$

в качестве X принять размер санитарно-защитной зоны (СЗЗ), равный 500 м (табл. 11).

Одним из допущений примем, что выбрасываемые предприятием вещества входят в группу суммации. Поэтому одним из критериев гигиенической чистоты будет проверка выполнения условия (2.2.7).

В качестве предельно допустимых концентраций вредных веществ примем ПДК_{мр} из табл. 12.

Для веществ, обладающих эффектом суммации, при одновременном совместном присутствии в воздухе нескольких веществ со своими значениями ПДК_і и концентрацией C_i ($i = 1, 2, 3, \dots, m$) их суммарное воздействие должно удовлетворять следующему условию:

$$\sum_{i=1}^m \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} = \frac{11}{20} + \frac{1,1}{5} + \dots \leq 1. \quad (2.2.7)$$

При выполнении данного неравенства можно сделать вывод о соответствии воздушной среды гигиеническим требованиям по содержанию в воздухе вредных веществ.

В случае невыполнения неравенства (2.2.7) воздушная среда будет негативно влиять на здоровье человека и живые организмы.

Задача 2.2.1. Оценить состояние воздушной среды в производственном помещении и загрязнение атмосферного воздуха в жилой зоне, расположенной около данного производственного помещения. Сделать вывод, соответствует ли нормативным требованиям воздух рабочей зоны и атмосфера воздуха жилой застройки, если в нем присутствуют загрязнители, указанные в табл. 11.

Таблица 11

Исходные данные для расчета к задаче 2.2.1

| Вещество | Содержание в воздухе рабочей зоны, мг/м ³ | ПДК _{рз} , мг/м ³ | Класс опасности по ГОСТ 12.1.007–79 | Масса выброса в атмосферу, г/с | ПДК в атмосферном воздухе | |
|--------------|--|---------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | | | | | ПДК _{сс} , мг/м ³ | ПДК _{мр} , мг/м ³ |
| СО | 1х, у | 20 | 4 | 2х, у | 3 | 5 |
| оксиды азота | 1, ху | 5 | 3 | 1, ху | 0,04 | 0,2 |

Окончание табл. 11

| Вещество | Содержание в воздухе рабочей зоны, мг/м ³ | ПДК _{рз} , мг/м ³ | Класс опасности по ГОСТ 12.1.007–79 | Масса выброса в атмосферу, г/с | ПДК в атмосферном воздухе | |
|--|--|---------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | | | | | ПДК _{сс} , мг/м ³ | ПДК _{мр} , мг/м ³ |
| SO ₂ | ху | 10 | 3 | 3, ху | 0,05 | 0,5 |
| фенол | 0,1ху | 0,3 | 2 | 0,1ху | 0,003 | 0,01 |
| Вместо х и у вставить последние две цифры номера зачетной книжки | | | | | | |

Примечание. Указанные вещества обладают эффектом суммации.

ПДК_{рз} — предельно допустимая концентрация вредного вещества в воздухе рабочей зоны по [14].

ПДК_{сс}, ПДК_{мр} — предельно допустимые концентрации в атмосферном воздухе жилой застройки, соответственно среднесуточная и максимальная разовая согласно [15].

Определить значение приземной концентрации данных веществ на границе санитарно-защитной зоны по заданным значениям выбросов в атмосферный воздух и сделать вывод о соблюдении санитарно-гигиенических требований к чистоте воздуха жилой зоны.

Вопросы

1. Как влияет концентрация вредного вещества, равная ПДК, на здоровье человека и окружающую среду?
2. Какие вы знаете виды ПДК и зоны их нормирования?
3. Какие виды поражения вызывают вредные вещества у человека?
4. Как соотносятся ПДК_{ав} и ПДК_{рз} для одного и того же вещества?
5. Какое требование предъявляется для расположения нового источника выброса на территории города?
6. Какие объекты нельзя располагать в санитарно-защитной зоне?
7. В чем сходство и отличие понятий ПДВ и ВСВ?
8. Как происходит рассеяние вредных веществ в атмосфере?

ГЛАВА 3. БЕЗОПАСНОСТЬ В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА (ОХРАНА ТРУДА)

3.1. Опасные и вредные производственные факторы. Условия труда работников

3.1.1. Оздоровление воздушной среды

В реальных производственных помещениях в воздушную среду непрерывно выделяется большое количество разнообразных вредных веществ, пары воды и большое количество тепла. Одним из методов оздоровления воздушной среды в производственном помещении является вентиляция. Наиболее распространенный вид вентиляции — общеобменная, основанная на принципах естественного или искусственного (механического) движения воздуха во всем объеме помещения.

Общеобменная вентиляция — это система, в которой воздухообмен, найденный из условий борьбы с вредностью, осуществляется путем подачи и вытяжки воздуха из всего помещения [16, 17].

При общеобменной вентиляции не важно, поступает ли воздух в помещение через системы воздушного душирования, или он удаляется через системы отсосов, зонтов, вытяжных проемов. Главное, что работает принцип: сколько воздуха поступило в помещение, столько и было из помещения удалено. Расчет воздухообмена при общеобменной вентиляции основан на принципе неразрывности среды.

При расчете общеобменной вентиляции искомое количество (объем) приточного воздуха при наличии в воздушной среде паров или га-

зов в установившемся режиме воздухообмена определяется из баланса поступающих в помещение и удаляемых из него вредных веществ:

$$G + L_{\text{пр}} \cdot C_{\text{пр}} = L_{\text{уд}} \cdot C_{\text{уд}}, \quad (3.1.1)$$

где G — количество поступающих вредных веществ, мг/ч; $L_{\text{пр}}$, $L_{\text{уд}}$ — количество приточного и удаляемого воздуха соответственно, м³/ч; $C_{\text{пр}}$, $C_{\text{уд}}$ — концентрация вредных веществ в приточном и удаляемом воздухе, мг/м³.

Исходя из условия неразрывности, очевидно, что количество приточного воздуха $L_{\text{пр}}$ должно быть равно количеству удаляемого $L_{\text{уд}}$. Тогда искомое количество воздуха для разбавления вредных веществ до санитарных норм (ПДК) находится по формуле:

$$L_{\text{пр}} = \frac{G}{C_{\text{уд}} - C_{\text{пр}}}, \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (3.1.2)$$

Чтобы не было нарушения санитарных норм, концентрация $C_{\text{уд}}$ не должна превышать предельно допустимую концентрацию, т.е. $C_{\text{уд}} \leq \text{ПДК}$. В расчетах принимаем $C_{\text{уд}}$ равным ПДК. Концентрация $C_{\text{пр}}$ должна быть по возможности минимальной (по санитарным нормам $C_{\text{пр}} \leq 0,3 \cdot \text{ПДК}$).

Пример 3.1.1. В монтажном цехе объемом $V = 10\,000 \text{ м}^3$ производится пайка и лужение мягким припоем ПОС-40. За 1 час работы расходуется 1 кг припоя, в состав которого входит 0,6 кг свинца. При пайке и лужении испаряется 0,1 % припоя. Определить количество воздуха, которое необходимо ввести в помещение, чтобы концентрация паров свинца не превышала допустимую по санитарным нормам величину. Содержание паров свинца в наружном воздухе принять равным 0,3 ПДК в рабочей зоне.

Предельно допустимая концентрация свинца в воздухе рабочей зоны, согласно ГН 2.2.5.1313–03, составляет $\text{ПДК}_{\text{рб}} = 0,01 \text{ мг/м}^3$.

Количество свинца, выделяющегося в рабочую зону за один час:

$$G = 0,6 \cdot 0,001 = 0,0006 \text{ кг/ч} = 600 \text{ мг/ч}.$$

Содержание свинца в приточном воздухе $C_{\text{пр}} = 0,3 \cdot 0,01 = 0,003 \text{ мг/м}^3$; содержание свинца в удаляемом воздухе принимается равным ПДК.

Подставляем полученные данные в (3.1.2):

$$V_{\text{вент}} = \frac{600}{0,7 \cdot 0,01} = 85714 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Кратность воздухообмена:

$$k = \frac{V_{\text{вент}}}{V_{\text{пом}}} = \frac{85714}{10000} = 8,6 \text{ ч}^{-1}.$$

Для удаления избыточного тепла из производственного помещения количество вентиляционного воздуха рассчитывается по формуле:

$$V_{\text{вент}} = \frac{3600 \cdot Q_{\text{изб}}}{\rho C \cdot (t_{\text{ух}} - t_{\text{пр}})}, \quad (3.1.3)$$

где $Q_{\text{изб}}$ — выделение в помещении явного тепла, Вт; C — теплоемкость воздуха ($C = 1,03 \cdot 10^3$ Дж/кг); ρ — плотность воздуха ($\rho = 1,3$ кг/м³); $t_{\text{ух}}$ и $t_{\text{пр}}$ — температура удаляемого и приточного воздуха, °С; для города Екатеринбурга среднегодовая температура приточного воздуха принимается равной $t_{\text{пр}} = 17,5$ °С.

Теплый воздух в помещении поднимается вверх. Поэтому температура удаляемого воздуха в верхней части помещения выше, чем на уровне пола. При расположении вытяжных проемов в верхней части помещения температуру удаляемого воздуха можно определить из формулы:

$$t_{\text{ух}} = t_{\text{рз}} + d(h - 2), \quad (3.1.4)$$

где $t_{\text{рз}}$ — температура воздуха в рабочей зоне, $t_{\text{рз}} = 24$ °С; d — коэффициент нарастания температуры на каждый метр высоты ($d = 1,5$ град/м); h — высота помещения.

Количество избыточного тепла определяется из теплового баланса как разность между теплом, поступающим в помещение, и теплом, удаляемым из помещения и поглощаемым в нем.

$$Q_{\text{изб}} = Q_{\text{прих}} - Q_{\text{расх}}. \quad (3.1.5)$$

Поступающее в помещение тепло определяется суммой всех источников, выделяющих тепло в помещении:

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{обор}} + Q_{\text{л}} + q_{\text{осв}} + Q_{\text{рад}}, \quad (3.1.6)$$

где $Q_{\text{обор}}$ — тепло от работы оборудования; $Q_{\text{л}}$ — тепло, поступающее от людей; $q_{\text{осв}}$ — тепло от источников освещения; $Q_{\text{рад}}$ — тепло от солнечной радиации через окна.

Тепло от работы оборудования зависит от электрической мощности установленного оборудования:

$$Q_{\text{обор}} = \eta \cdot P_{\text{уст}}, \quad (3.1.7)$$

где η — доля энергии, переходящей в тепло; $P_{\text{уст}}$ — мощность электрооборудования.

Тепло, поступающее от людей, зависит от количества работающих в помещении людей и степени физической тяжести работы:

$$Q_{\text{л}} = n \cdot q, \quad (3.1.8)$$

где n — количество работающих в помещении; q — количество тепла, выделяемого человеком при работе ($q = 90$ Вт для легкой физической нагрузки).

Тепло от источников освещения зависит от электрической мощности установленных источников освещения:

$$q_{\text{осв}} = P_{\text{осв}} \cdot k_{\text{л}}, \quad (3.1.9)$$

где $P_{\text{осв}}$ — мощность осветительной установки; $k_{\text{л}} = 0,4$ для люминесцентных ламп.

Тепло от солнечной радиации через окна зависит от площади оконных проемов и их светопропускающей способности:

$$Q_{\text{рад}} = A \cdot k \cdot S_{\text{о}} \cdot m, \quad (3.1.10)$$

где A — теплоступление в помещение с 1 м^2 стекла ($A = 127 \dots 234 \text{ Вт/м}^2$); $S_{\text{о}}$ — площадь окна ($S_{\text{о}} = 3, 4, 5, 6$), м^2 ; m — количество окон ($m = 3, 2, 1$); k — коэффициент, учитывающий характер остекления.

Потери тепла через неплотности в наружных ограждениях здания:

$$Q_{\text{расх}} = 0,1 \cdot Q_{\text{прих}}. \quad (3.1.11)$$

Определив $Q_{\text{изб}}$, по формуле (3.1.3) находим необходимый объем воздуха для воздухообмена — $V_{\text{вент}}$.

Кратность воздухообмена определяется по формуле:

$$k = \frac{V_{\text{вент}}}{V_{\text{пом}}}, \quad (3.1.12)$$

где $V_{\text{пом}}$ — объем помещения, м^3 .

Задача 3.1.1. В цехе объемом $V = 7000 \text{ м}^3$ производится работа, связанная с выделением за 1 час вредного вещества согласно данным вариантов из табл. 12. Определить количество воздуха, которое необходимо ввести в помещение, чтобы концентрация паров не превышала допустимую по санитарным нормам величину. Содержание паров вещества в наружном воздухе принять равным $0,3$ ПДК в рабочей зоне. Определить необходимую кратность воздухообмена (ч^{-1}) по формуле (3.1.12), чтобы концентрация паров ацетона не превышала ПДК.

Таблица 12

Исходные данные для расчета

| Вариант | Вещества | ПДК мг/м ³ | Класс опасности | Кол-во поступающих вредных в-в, мг/ч | Особенности действия на организм |
|---------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------|--|--|
| 1 | Азота оксиды | 5,0 | III | 100 | О |
| 2 | Акролеин | 0,2 | II | 20 | К, Ф |
| 3 | Аммиак | 20,0 | IV | 1000 | О |
| 4 | Анилин | 0,1 | II | 50 | + |
| 5 | Ацетон | 200, | IV | 1500 | О |
| 6 | Ангидрид сернистый | 10,0 | III | 300 | + |
| 7 | Ангидрид серный | 1,0 | III | 100 | + |
| 8 | Ангидрид хромовый | 0,01 | I | 10 | + |
| 9 | Бензол | 15,0 | II | 400 | + |
| 10 | Бенз(а)пирен | 0,00015 | I | 0,1 | К |
| 11 | Водород фтористый | 0,5 | I | 1 | О |
| 12 | Кислота азотная | 2,0 | III | 5 | + |
| 13 | Кислота муравьиная | 1,0 | II | 4 | + |
| 14 | Кислота серная | 1,0 | II | 8 | + |
| 15 | Марганец (в сварочных аэрозолях) | 0,2 | II | 2 | К, Ф |
| 16 | Медь | 1,0 | II | 5 | Ф, К |
| 17 | Никель и его соединения | 0,05 | I | 0,1 | К, А |
| 18 | Нитробензол | 3,0 | II | 10 | + |
| 19 | Нитроформ | 0,5 | II | 2,5 | + |
| 20 | Ртуть металлическая | 0,01 | I | 0,15 | Ф, К |
| 21 | Электрокорунд | 6,0 | IV | 250 | Ф |
| 22 | Сероуглерод | 1,0 | III | 10 | О |
| 23 | Сероводород | 10,0 | II | 200 | О |
| 24 | Бутанол | 10,0 | III | 250 | + |
| 25 | Метанол | 5,0 | III | 25 | + |
| 26 | Этанол | 1000 | IV | 3000 | + |
| 27 | Фенол | 0,3 | II | 2 | Ф |
| 28 | Углерода оксид | 20,0 | IV | 300 | О |
| 29 | Этиленгликоль | 5,0 | III | 50 | А |

+ требуется защита кожи и глаз; К — канцерогены; Ф — аэрозоли преимущественно фиброгенного действия; О — вещества с остронаправленным действием, требующие автоматического контроля за их содержанием; А — вещества, способные вызвать аллергические заболевания

Задача 3.1.2. Определить необходимое количество воздуха и кратность воздухообмена общеобменной вентиляции, предназначенной для удаления избытков тепла в кабине наблюдения и управления производственным процессом. Исходные данные для расчета взять из табл. 13. Результаты расчета свести в табл. 14. В выводе проанализировать результаты расчета.

Таблица 13

Исходные данные для расчета

| Параметр | Обозначение | Размерность | Варианты | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-------------|----------------|----------|------|-----|------|------|-----|-----|-----|------|------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Размеры помещения: | | | | | | | | | | | | |
| высота | h | м | 3,2 | 4 | 5 | 6 | 5 | 4 | 6 | 3,2 | 5 | 3,5 |
| площадь | S | м ² | 18 | 24 | 30 | 36 | 30 | 24 | 32 | 24 | 30 | 24 |
| Кол-во работников | n | чел. | 3 | 4 | 5 | 6 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 |
| Мощность электроустановок | $P_{уст}$ | кВт | 3,2 | 3,5 | 4,3 | 2,8 | 5,3 | 4,1 | 5,2 | 5,6 | 4,2 | 3,7 |
| Мощность осветительной установки | $P_{осв}$ | кВт | 1,0 | 1,65 | 2,6 | 2,75 | 3,2 | 2,9 | 3,0 | 3,0 | 2,6 | 1,8 |
| Коэффициент характера остекления | k | — | 0,7 | 0,75 | 0,8 | 0,9 | 0,75 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 0,8 | 0,75 |
| Площадь окна | S_o | м ² | 6 | 5 | 8 | 4 | 9,5 | 7,5 | 18 | 5 | 10,5 | 5 |
| Количество окон | m | шт. | 2 | 2 | 2 | 4 | 2 | 2 | 1 | 3 | 3 | 3 |

Таблица 14

Результаты расчета воздухообмена

| Обозначение | Величина | Формула | Значение | Размерность |
|-------------|------------------------------------|--|----------|-------------------|
| $V_{вент}$ | Количество вентиляционного воздуха | $\frac{3600 \cdot Q_{изб}}{C \cdot (t_{ух} - t_{пр}) \cdot \bar{\rho}_{возд}}$ | | м ³ /ч |

Продолжение табл. 14

| Обозначение | Величина | Формула | Значение | Размерность |
|----------------------------|--|--|-------------------|-------------------|
| C | Теплоемкость воздуха | Задано | $1,03 \cdot 10^3$ | Дж/кг |
| $\bar{\rho}_{\text{возд}}$ | Плотность воздуха | Задано | 1,3 | Кг/м ³ |
| $t_{\text{ух}}$ | Температура удаляемого воздуха | $t_{\text{рз}} + d(h-2)$ | | °С |
| $t_{\text{пр}}$ | Температура приточного воздуха | Принимается | 17,5 | °С |
| $t_{\text{рз}}$ | Температура рабочей зоны | Задано | 24 | °С |
| d | Коэффициент нарастания температуры | Задано | | — |
| h | Высота помещения | Задано | | м |
| $Q_{\text{изб}}$ | Кол-во избыточного тепла | $Q_{\text{прих}} - Q_{\text{расх}}$ | | Вт |
| $Q_{\text{прих}}$ | Поступающее тепло | $Q_{\text{обор}} + Q_{\text{л}} + Q_{\text{осв}} + Q_{\text{рад}}$ | | Вт |
| $Q_{\text{обор}}$ | Теплота от работы оборудования | $\eta \cdot P_{\text{уст}}$ | | Вт |
| η | Доля энергии, переходящей в теплоту | Задано | 0,15 | — |
| $P_{\text{уст}}$ | Мощность установок | Задано | | Вт |
| $Q_{\text{л}}$ | Теплота, выделяемая людьми | $n \cdot q$ | | Вт |
| n | Количество работающих | Задано | | чел. |
| q | Количество тепла, выделяемое человеком | Задано | 90 | Вт/чел. |
| $Q_{\text{осв}}$ | Количество теплоты от источников освещения | $k_{\text{л}} \cdot P_{\text{осв}}$ | | Вт |
| $k_{\text{л}}$ | Коэффициент освещения | Задано | 0,4 | — |
| $P_{\text{осв}}$ | Мощность освещения | Задано | | Вт |
| $Q_{\text{рад}}$ | Количество теплоты от солнечной радиации | $A \cdot k \cdot S_0 \cdot t$ | | Вт |
| A | Теплопоступление в помещение с 1 м ² стекла | Принимается | | Вт/м ² |
| k | Коэффициент остекления | Задано | | |

Окончание табл. 14

| Обозначение | Величина | Формула | Значение | Размерность |
|-------------------|---------------------------|----------------------------------|----------|-----------------|
| S_o | Площадь окна | Задано | | м ² |
| m | Количество окон | Задано | | — |
| $Q_{\text{расх}}$ | Потери через не плотности | $0,1 \cdot Q_{\text{прих}}$ | | Вт |
| $V_{\text{пом}}$ | Объем помещения | $S_{\text{пом}} \cdot h$ | | м ³ |
| $S_{\text{пом}}$ | Площадь помещения | Задано | | м ² |
| k | Кратность воздухообмена | $V_{\text{вент}}/V_{\text{пом}}$ | | ч ⁻¹ |

3.2. Оценка световой среды производственных помещений

По источнику излучения светового потока различают **естественное**, **совмещенное** (комбинированное) и **искусственное** освещение.

Естественное освещение изменяется в очень широких пределах и зависит от времени суток, времени года, облачности и т. д. Поэтому принято характеризовать его не абсолютным значением освещенности на рабочем месте, а относительным в виде **коэффициента естественной освещенности** (КЕО). Фактическое значение КЕО (e_{ϕ}) представляет собой отношение естественной освещенности внутри помещения в точках ее минимального значения на рабочей поверхности к одновременно замеренному значению освещенности наружной горизонтальной поверхности, освещенной диффузным светом полностью открытого небосвода (непрямым солнечным светом):

$$e_{\phi} = \frac{E_{\text{вн}}}{E_{\text{нар}}} 100 \%, \quad (3.2.1)$$

где $E_{\text{вн}}$ — освещенность внутри помещения, лк; $E_{\text{нар}}$ — наружная освещенность, лк.

Нормативом освещенности рабочего места от естественного света является **нормативный коэффициент естественной освещенности** (e_N), который зависит от разряда и подразряда зрительной работы. Кроме того, учитывается коэффициент светового климата помещения [18].

Нормируемое значение КЕО (e_N) следует определять по формуле:

$$e_N = e_n \cdot m_N, \quad (3.2.2)$$

где N — номер группы обеспеченности естественным светом; e_n — нормативное значение КЕО, соответствующее разряду и подразряду зрительной работы, %; m_N — коэффициент светового климата помещения.

Пример 3.2.1. Определить, соответствует ли нормам естественная освещенность в производственном помещении, если: наружная освещенность $E_{\text{нар}} = 10\,000$ лк; внутренняя освещенность $E_{\text{вн}} = 100$ лк; нормативное значение КЕО, соответствующее разряду и подразряду зрительной работы $e_n = 1,5\%$. Коэффициент светового климата $m_N = 0,75$.

$$\text{Фактический КЕО} = \frac{E_{\text{вн}}}{E_{\text{нар}}} 100\% = 1,0\%.$$

Нормативная освещенность $e_N = e_n \cdot m_N = 1,125\%$.

Ответ: естественная освещенность в помещении **не соответствует** гигиеническим нормативам, так как фактическое значение $e_{\text{ф}}$ меньше нормативного значения e_N .

Задача 3.2.1. Определить, соответствует ли нормам естественная освещенность, если заданы наружная освещенность $E_{\text{нар}}$, внутренняя освещенность $E_{\text{вн}}$; нормативное значение КЕО согласно разряду и подразряду зрительной работы e_n ; коэффициент светового климата m_N .

Коэффициент светового климата m_N и другие исходные данные для расчета приведены в табл. 15.

Полученные по формуле (3.2.2) значения необходимо округлять до десятых долей.

Сравнив полученные значения $e_{\text{ф}}$ и e_N , сделать вывод о соответствии естественной освещенности санитарно-гигиеническим требованиям.

Таблица 15

Исходные данные для расчета естественной освещенности

| № варианта | $E_{\text{нар}}$, лк | $E_{\text{вн}}$, лк | e_n , % | Коэффициент светового климата m_N |
|------------|-----------------------|----------------------|-----------|-------------------------------------|
| 1 | 10000 | 74 | 0,7 | 1,0 |
| 2 | 5500 | 180 | 3,0 | 0,8 |
| 3 | 8500 | 350 | 4,0 | 1,1 |
| 4 | 7000 | 320 | 4,2 | 0,9 |
| 5 | 6200 | 220 | 3,5 | 0,85 |
| 6 | 12000 | 125 | 1,2 | 1,2 |

Окончание табл. 15

| № варианта | $E_{\text{нар}}$, ЛК | $E_{\text{вн}}$, ЛК | e_n , % | Коэффици- ент светового климата m_N |
|---------------|-----------------------|----------------------|-----------|---|
| 7 | 20000 | 250 | 1,5 | 0,7 |
| 8 | 6000 | 120 | 1,8 | 0,75 |
| 9 | 15000 | 300 | 2,0 | 1,0 |
| 10 | 18000 | 220 | 1,0 | 1,1 |
| 11 | 9000 | 80 | 0,7 | 0,9 |
| 12 | 7500 | 100 | 3,0 | 0,8 |
| 13 | 9500 | 300 | 4,0 | 0,75 |
| 14 | 8000 | 300 | 4,2 | 0,8 |
| 15 | 5200 | 320 | 3,5 | 0,9 |
| 16 | 10000 | 105 | 1,2 | 1,0 |
| 17 | 25000 | 350 | 1,5 | 1,1 |
| 18 | 16000 | 220 | 1,8 | 1,2 |
| 19 | 25000 | 200 | 2,0 | 1,2 |
| 20 | 15000 | 200 | 1,0 | 1,1 |
| 21 | 12000 | 174 | 0,7 | 1,0 |
| 22 | 7500 | 150 | 3,0 | 0,9 |
| 23 | 8500 | 250 | 4,0 | 0,8 |
| 24 | 6000 | 120 | 4,2 | 0,75 |
| 25 | 7200 | 250 | 3,5 | 1,2 |
| 26 | 22000 | 225 | 1,2 | 1,1 |
| 27 | 10000 | 150 | 1,5 | 1,0 |
| 28 | 7000 | 100 | 1,8 | 0,9 |
| 29 | 10000 | 150 | 2,0 | 0,8 |
| 30 | 28000 | 320 | 1,0 | 0,75 |

3.3. Виброакустические факторы

Слышимый звук (шум) — это среднеквадратичные колебания звукового давления относительно атмосферного с частотами от 20 до 20 000 Гц и временем усреднения 30...100 миллисекунд.

Слуховое воздействие шума вызывает утомление звукового анализатора, кратковременную или постоянную потерю слуха, ухудшение четкости речи и восприятия звука.

Внеслуховое воздействие шума вызывает ухудшение показателей переработки информации, снижается темп и ухудшается качество выполняемой работы.

Звуковой анализатор человека обладает **неодинаковой чувствительностью** к звуковым колебаниям разной частоты, поэтому при оценке шума принято разбивать весь его диапазон на октавные полосы и для каждой полосы определять уровень звукового давления [19].

Гигиеническая оценка шума: частотный диапазон разбивают на **9 октавных полос** со среднегеометрическими частотами соответственно 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц, измеряют уровни звукового давления и строят **спектр шума**.

При оценке шума удобно использовать логарифмический показатель, который называется **уровнем звука** и измеряется в единицах дБ. Причем размерность этой величины «бел» названа по имени изобретателя телефона А. Белла (1847–1922). Получила распространение более мелкая единица измерения: одна десятая часть бела — децибел (1 дБ = 0,1 Б). При этом на практике применяют два разных параметра: уровень интенсивности звука L_J и уровень звукового давления L_P .

Уровень интенсивности звука L_J в дБ определяют по формуле:

$$L_J = 10 \cdot \lg \frac{J}{J_0}, \quad (3.3.1)$$

где J — интенсивность в точке измерения, Вт/м²; J_0 — интенсивность, соответствующая порогу слышимости, 10^{-12} Вт/м².

При гигиенической оценке и нормировании шума чаще используется параметр **уровень звукового давления** L_P в дБ, который рассчитывается по формуле:

$$L_P = 10 \cdot \lg \frac{P^2}{P_0^2} = 20 \cdot \lg \frac{P}{P_0}, \quad (3.3.2)$$

где P — звуковое давление в точке измерения, Па; P_0 — порог слышимости $2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Значения L_J и L_P численно совпадают при нормальных физических условиях.

В производственном помещении, как правило, расположено несколько источников шума. Суммарный уровень звукового давления нескольких различных источников звука определяется по формуле:

$$L = 10 \cdot \lg [10^{(L_1/10)} + 10^{(L_2/10)} + \dots + 10^{(L_n/10)}]; \quad (3.3.3)$$

где L_1, L_2, \dots, L_n — уровни звукового давления, создаваемые каждым из источников шума в исследуемой точке пространства.

Если все источники шума в производственном помещении одинаковы по своему уровню звукового давления, то суммарный уровень шума равен:

$$L_{\Sigma} = L_i + 10 \lg (n), \quad (3.3.4)$$

где L_i — уровень звукового давления одного источника, дБ; n — количество источников шума.

Например, два одинаковых источника совместно создадут уровень шума на 3 дБ больше, чем каждый из них в отдельности.

Суммарный уровень шума от двух различных по своему уровню источников можно определить по формуле:

$$L_{\Sigma} = L_{\max} + \Delta L, \quad (3.3.5)$$

где L_{\max} — максимальный уровень звукового давления одного из двух источников; ΔL — поправка, зависящая от разности между максимальным и минимальным уровнем звукового давления. Значение поправки ΔL при сложении уровней шума, дБ:

| | | | | | | | | | | |
|-------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|
| $L_1 - L_2$ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 |
| ΔL | 3 | 2,5 | 2,2 | 1,8 | 1,5 | 1,2 | 1 | 0,8 | 0,6 | 0,4 |

Пример 3.3.1. Определить уровень интенсивности звука в расчетной точке помещения, создаваемый десятью одинаковыми источниками, интенсивностью 10^{-7} Вт/м² каждый. Интенсивность звука, соответствующая порогу слышимости, составляет 10^{-12} Вт/м².

Рассчитаем уровень интенсивности звука, создаваемый одним источником:

$$L = 10 \lg \frac{J}{J_0} = 10 \lg \frac{10^{-7}}{10^{-12}} = 50 \text{ дБ.}$$

Рассчитаем суммарный уровень интенсивности звука:

$$L_{\Sigma} = L_i + 10 \lg (n) = 50 + 10 \lg (10) = 60 \text{ дБ.}$$

Вывод: уровень интенсивности звука при одновременной работе десяти источников составит 60 дБ.

Задача 3.3.1. Определить уровень интенсивности звука в расчетной точке помещения, который создается n одинаковыми источниками интенсивностью J Вт/м² каждый:

| | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| n | 10 | 9 | 8 | 7 | 11 | 12 | 13 | 9 | 6 | 10 | 5 | 15 |
| $J, \text{Вт/м}^2$ | 10^{-5} | 10^{-6} | 10^{-7} | 10^{-4} | 10^{-5} | 10^{-6} | 10^{-7} | 10^{-4} | 10^{-8} | 10^{-8} | 10^{-7} | 10^{-4} |

Задача 3.3.2. В расчетную точку поступает шум от трех источников с уровнями звукового давления L_1 , L_2 , и L_3 в дБА:

| | | | | | | | | | | |
|---------|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| L_1 | 70 | 67 | 77 | 74 | 76 | 75 | 70 | 72 | 68 | 60 |
| L_2 | 75 | 71 | 78 | 78 | 76 | 77 | 73 | 73 | 72 | 70 |
| L_3 | 76,2 | 75 | 79 | 78 | 76 | 74 | 78 | 75 | 77 | 75 |

Соответствует ли суммарный уровень шума нормативному значению 80 дБА? Для решения необходимо воспользоваться данными из табл. 15.

Порядок решения задачи

Проводят попарно последовательно суммирование измеренных уровней L_1 , L_2 , и L_3 следующим образом. По разности двух уровней L_1 и L_2 по табл. 15 определяют добавку ΔL , которую прибавляют к большему уровню L_1 , в результате чего получают уровень $L_{1,2} = L_1 + \Delta L$. Уровень $L_{1,2}$ суммируется таким же образом с уровнем L_3 , получается уровень $L_{1,2,3}$ и т. д. Окончательный результат $L_{\text{сум}}$ округляют до целого числа децибел.

3.3.1. Защита от шума и вибрации

В настоящее время для снижения шума и вибрации в рабочей зоне производственных помещений применяются следующие методы:

- ◇ снижение шума в источнике: применение глушителей шума на коробах и трубопроводах;
- ◇ покрытие стен и потолков помещений звукопоглощающими материалами;
- ◇ установка оборудования на виброизолирующих опорах.

Для расчета глушителя шума, установленного на коробе вентиляции, необходимо, зная измеренные значения уровней звукового давления шума в 9 октавных полосах, выбрать **звукопоглощающий материал (ЗПМ)** для облицовки глушителя. Звукопоглощающий материал, применяемый в глушителях, должен обладать высоким звукопоглощением в требуемом диапазоне частот, т. е. характер изменения коэффициентов звукопоглощения ЗПМ в октавных полосах частот должен быть подобен частотной характеристике требуемого снижения шума.

Поэтому на первом этапе проводится определение необходимого снижения шума для каждой из 9 октавных полос:

$$\Delta L_{\text{тр}_i} = L_i - L_{i_{\text{доп}}} , \quad (3.3.6)$$

где L_i — измеренные уровни давления шума в i -й октавной полосе; $L_{i_{\text{доп}}}$ — предельно допустимые уровни давления шума в i -й октавной полосе по санитарным нормам СН 2.2.4/2.1.8.562—96.

Результаты расчета требуемого снижения шума заносятся в табличную форму:

| | | | | | | | | |
|-------------------------------|----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| Частота, Гц | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| $L_{i_{\text{доп}}}$, дБ | 95 | 87 | 82 | 78 | 75 | 73 | 71 | 69 |
| L_i , дБ | | | | | | | | |
| $\Delta L_{\text{тр}_i}$, дБ | | | | | | | | |

Рекомендуемый перечень материалов, отвечающий как санитарно-гигиеническим требованиям, так и требованиям пожарной безопасности, а также соответствующие им коэффициенты звукопоглощения приведены в табл. П.2.

Для каждой из 9 октавных полос рассчитывается длина облицованной шумогасящим материалом части глушителя по формуле:

$$l = \frac{\Delta L_{\text{тр}_i} S}{1,09 \cdot \varphi(\alpha) \cdot \Pi} , \quad (3.3.6)$$

где l — длина облицовочной части канала, м; Π — периметр канала воздуховода, м; S — площадь поперечного сечения канала воздуховода, м²; $\varphi(\alpha)$ — функция звукопоглощения, имеющая следующие значения:

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| α | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |
| $\varphi(\alpha)$ | 0,1 | 0,2 | 0,35 | 0,5 | 0,65 | 0,9 | 1,2 | 1,6 | 2,0 | 4,0 |

Длина глушителя выбирается по наибольшему из полученных расчетом значений.

Задача 3.3.1. Расчет глушителя шума системы вентиляции. Подобрать звукопоглощающий материал и определить длину глушителя вентиляционного шума, необходимую для снижения шума до нормативных значений, если канал, по которому распространяется шум, имеет сечение $b \cdot h$, измеренные уровни звукового давления в октавах $L_{63} \dots L_{8000}$, дБ, заданы в табл. 16.

Таблица 16

Исходные данные для расчета глушителя шума

| № варианта | L_i , дБ, при среднегеометрических частотах октавных полос, Гц | | | | | | | | Размеры помещения | |
|------------|--|-----|-----|-----|------|------|------|------|-------------------|---------|
| | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | b , м | h , м |
| 1 | 90 | 95 | 92 | 90 | 88 | 82 | 80 | 72 | 0,15 | 0,1 |
| 2 | 92 | 93 | 90 | 89 | 89 | 81 | 80 | 76 | 0,2 | 0,2 |
| 3 | 92 | 90 | 89 | 89 | 86 | 82 | 81 | 79 | 0,1 | 0,3 |
| 4 | 96 | 93 | 92 | 90 | 89 | 86 | 81 | 76 | 0,25 | 0,15 |
| 5 | 90 | 91 | 89 | 88 | 88 | 86 | 78 | 75 | 0,3 | 0,25 |
| 6 | 92 | 96 | 91 | 90 | 86 | 86 | 80 | 79 | 0,4 | 0,35 |
| 7 | 90 | 90 | 90 | 91 | 87 | 82 | 79 | 76 | 0,35 | 0,4 |
| 8 | 98 | 92 | 94 | 96 | 88 | 90 | 86 | 80 | 0,1 | 0,45 |
| 9 | 90 | 92 | 96 | 89 | 83 | 86 | 81 | 78 | 0,15 | 0,5 |
| 10 | 98 | 100 | 99 | 85 | 91 | 81 | 80 | 76 | 0,2 | 0,1 |
| 11 | 92 | 95 | 90 | 90 | 85 | 80 | 80 | 75 | 0,25 | 0,11 |
| 12 | 92 | 95 | 95 | 80 | 80 | 85 | 80 | 70 | 0,12 | 0,21 |
| 13 | 90 | 92 | 80 | 85 | 85 | 80 | 85 | 90 | 0,15 | 0,30 |
| 14 | 95 | 95 | 95 | 90 | 90 | 80 | 85 | 78 | 0,2 | 0,15 |
| 15 | 90 | 90 | 85 | 85 | 85 | 86 | 80 | 78 | 0,13 | 0,2 |
| 16 | 92 | 92 | 90 | 90 | 80 | 80 | 85 | 75 | 0,35 | 0,3 |
| 17 | 88 | 88 | 90 | 98 | 85 | 82 | 70 | 70 | 0,3 | 0,4 |
| 18 | 95 | 95 | 95 | 96 | 82 | 90 | 80 | 82 | 0,15 | 0,4 |
| 19 | 92 | 92 | 90 | 90 | 80 | 85 | 85 | 80 | 0,25 | 0,45 |
| 20 | 99 | 100 | 105 | 80 | 95 | 85 | 80 | 79 | 0,25 | 0,15 |
| 21 | 88 | 85 | 82 | 80 | 88 | 82 | 70 | 75 | 0,1 | 0,1 |
| 22 | 82 | 83 | 80 | 79 | 79 | 71 | 70 | 76 | 0,12 | 0,25 |
| 23 | 82 | 80 | 79 | 79 | 76 | 82 | 85 | 89 | 0,15 | 0,35 |
| 24 | 86 | 83 | 82 | 80 | 85 | 85 | 85 | 86 | 0,2 | 0,25 |
| 25 | 80 | 81 | 89 | 88 | 88 | 86 | 88 | 85 | 0,23 | 0,2 |
| 26 | 82 | 86 | 81 | 90 | 96 | 96 | 80 | 89 | 0,45 | 0,45 |
| 27 | 80 | 80 | 80 | 85 | 89 | 92 | 99 | 96 | 0,3 | 0,45 |
| 28 | 88 | 82 | 84 | 86 | 88 | 90 | 96 | 100 | 0,15 | 0,45 |
| 29 | 80 | 82 | 86 | 89 | 93 | 96 | 91 | 98 | 0,2 | 0,55 |
| 30 | 88 | 90 | 89 | 85 | 95 | 91 | 90 | 86 | 0,25 | 0,1 |

Задача 3.3.2. Определить уровень звукового давления после звукопоглощающей облицовки производственного помещения. В производственном помещении проведена установка звукопоглощающей облицовки на потолке и половине площади стен. Материал облицовки

подобрать, исходя из требуемого снижения шума, задавшись уровнями звукового давления и геометрией помещения по табл. 17.

Таблица 17

Уровни звукового давления в помещении

| № варианта | L_i , дБ, при среднегеометрических частотах октавных полос, Гц | | | | | | | | Номер предельного спектра | l , м | b , м | h , м |
|------------|--|-----|-----|-----|------|------|------|------|---------------------------|---------|---------|---------|
| | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | | | | |
| 1 | 82 | 69 | 61 | 44 | 48 | 48 | 44 | 47 | ПС-75 | 60 | 12 | 6 |
| 2 | 92 | 90 | 80 | 69 | 60 | 61 | 65 | 56 | ПС-75 | 66 | 12 | 6 |
| 3 | 85 | 82 | 75 | 72 | 55 | 58 | 62 | 50 | ПС-75 | 90 | 12 | 6 |
| 4 | 96 | 93 | 82 | 70 | 69 | 66 | 66 | 56 | ПС-75 | 102 | 24 | 6 |
| 5 | 90 | 81 | 79 | 78 | 58 | 56 | 65 | 55 | ПС-75 | 78 | 12 | 6 |
| 6 | 82 | 66 | 61 | 50 | 56 | 46 | 45 | 49 | ПС-75 | 72 | 12 | 3 |
| 7 | 90 | 90 | 80 | 81 | 67 | 70 | 68 | 66 | ПС-75 | 72 | 24 | 9 |
| 8 | 80 | 72 | 74 | 66 | 58 | 50 | 61 | 50 | ПС-75 | 96 | 24 | 6 |
| 9 | 90 | 92 | 76 | 79 | 83 | 66 | 69 | 58 | ПС-75 | 54 | 12 | 5 |
| 10 | 98 | 90 | 79 | 85 | 81 | 71 | 75 | 56 | ПС-75 | 96 | 24 | 6 |
| 11 | 92 | 79 | 71 | 54 | 58 | 58 | 54 | 57 | ПС-45 | 60 | 12 | 6 |
| 12 | 92 | 80 | 90 | 79 | 65 | 65 | 55 | 66 | ПС-60 | 66 | 12 | 6 |
| 13 | 75 | 72 | 65 | 62 | 65 | 58 | 52 | 50 | ПС-55 | 90 | 12 | 6 |
| 14 | 86 | 83 | 72 | 60 | 59 | 56 | 56 | 56 | ПС-60 | 102 | 24 | 6 |
| 15 | 80 | 81 | 89 | 68 | 68 | 56 | 55 | 55 | ПС-60 | 78 | 12 | 6 |
| 16 | 72 | 56 | 51 | 50 | 46 | 46 | 45 | 39 | ПС-45 | 72 | 12 | 3 |
| 17 | 80 | 80 | 80 | 81 | 57 | 60 | 58 | 56 | ПС-70 | 72 | 24 | 9 |
| 18 | 70 | 62 | 64 | 66 | 48 | 40 | 51 | 50 | ПС-55 | 96 | 24 | 6 |
| 19 | 80 | 98 | 76 | 76 | 73 | 56 | 59 | 58 | ПС-70 | 54 | 12 | 5 |
| 20 | 88 | 80 | 69 | 75 | 71 | 61 | 65 | 66 | ПС-75 | 96 | 24 | 6 |
| 21 | 82 | 59 | 51 | 54 | 48 | 58 | 54 | 47 | ПС-45 | 60 | 12 | 6 |
| 22 | 92 | 90 | 80 | 69 | 60 | 61 | 65 | 60 | ПС-60 | 66 | 12 | 6 |
| 23 | 79 | 70 | 55 | 52 | 55 | 60 | 60 | 60 | ПС-55 | 90 | 12 | 6 |
| 24 | 76 | 73 | 72 | 70 | 79 | 76 | 76 | 66 | ПС-60 | 102 | 24 | 6 |
| 25 | 70 | 71 | 69 | 68 | 58 | 66 | 75 | 75 | ПС-60 | 78 | 12 | 6 |
| 26 | 62 | 56 | 51 | 60 | 46 | 55 | 55 | 59 | ПС-45 | 72 | 12 | 3 |
| 27 | 90 | 85 | 85 | 71 | 77 | 70 | 68 | 66 | ПС-70 | 72 | 24 | 9 |
| 28 | 60 | 62 | 84 | 76 | 68 | 50 | 51 | 55 | ПС-55 | 96 | 24 | 6 |
| 29 | 90 | 82 | 86 | 75 | 73 | 70 | 69 | 55 | ПС-70 | 54 | 12 | 5 |
| 30 | 95 | 90 | 89 | 75 | 70 | 70 | 70 | 70 | ПС-75 | 96 | 24 | 6 |

Номер предельного спектра соответствует уровню звукового давления в октавной полосе 1000 Гц согласно СН 2.2.4/2.1.8.562–96 (табл. П.3)

На первом этапе решения задачи необходимо определить требуемое снижение уровней шума в 9 октавных полосах и записать результаты в табличную форму:

| Величина | Раз- мер- ность | Ссылка | Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц | | | | | | | |
|--|-----------------------|---|--|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| | | | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| Уровень зву- кового давле- ния в цехе, L_i | дБ | Табл. 16 | | | | | | | | |
| Допустимый уровень, $L_{\text{доп } i}$ | дБ | Табл. П.3 | | | | | | | | |
| Превышение допустимых уровней зву- кового давле- ния | дБ | $L_i - L_{\text{доп } i}$ | | | | | | | | |
| B_{1000} | м ² | Табл. 18 | | | | | | | | |
| μ | — | Табл. 19 | | | | | | | | |
| B_i | м ² | $B_{1000} \cdot \mu$ | | | | | | | | |
| S | м ² | $S = 2S_1 + 2S_2 +$ $+ 2S_3$ | | | | | | | | |
| B_i/S | — | | | | | | | | | |
| A_i | м ² | $A_i = \frac{B_i}{B_i/S + 1}$ | | | | | | | | |
| $\bar{\alpha}_i$ | — | $\bar{\alpha}_i = \frac{B_i}{B_i + S}$ | | | | | | | | |
| $\alpha_{\text{обл}_i}$ | — | Табл. П.2 | | | | | | | | |
| ΔA_i | м ² | $\Delta A_i = \alpha_{\text{обл}_i} \cdot S_{\text{обл}}$ | | | | | | | | |
| A_{i_i} | м ² | $A_{i_i} = \bar{\alpha}_i (S - S_{\text{обл}})$ | | | | | | | | |

| Величины | Раз- мер- ность | Ссылка | Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц | | | | | | | |
|--------------------------|-----------------------|---|--|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| | | | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| $A_{l_i} + \Delta A_i$ | м ² | — | | | | | | | | |
| $\bar{\alpha}_{l_i}$ | — | $\bar{\alpha}_{l_i} = \frac{A_{l_i} + \Delta A_i}{S}$ | | | | | | | | |
| $1 - \bar{\alpha}_{l_i}$ | — | — | | | | | | | | |
| B_{l_i} | м ² | $B_{l_i} = \frac{A_i + \Delta A_i}{1 - \bar{\alpha}_{l_i}}$ | | | | | | | | |
| B_{l_i} / B_i | — | — | | | | | | | | |
| ΔL_i | дБ | $\Delta L_i = 10 \lg \frac{B_{l_i}}{B_i}$ | | | | | | | | |

На втором этапе, исходя из требований по снижению шума в октавных полосах и гигиенических особенностей помещения, выбирается звукопоглощающий материал (ЗПМ) по табл. П.3.

На третьем этапе определяем площадь ограждающих поверхностей помещения, м²:

$$S = 2 S_1 + 2 S_2 + 2 S_3, \quad (3.3.7)$$

где S_1 — площадь одной стены, $S_1 = b \cdot h$, м²; S_2 — площадь другой стены, $S_2 = l \cdot h$, м²; S_3 — площадь потолка или пола, $S_3 = l \cdot b$, м².

Площадь облицованных стен и потолка, м²:

$$S_{\text{обл}} = 2 \left(l \cdot \frac{h}{2} \right) + 2 \left(b \cdot \frac{h}{2} \right) + S_3, \quad (3.3.8)$$

Постоянная помещения B_i , м², в октавных полосах частот:

$$B_i = B_{1000} \cdot \mu, \quad (3.3.9)$$

где B_{1000} — постоянная помещения, м², на среднегеометрической частоте 1000 Гц, определяемая в зависимости от объема V , м³, и типа помещения по табл. 18; μ — частотный множитель, определяемый в зависимости от объема помещения V , м³, по табл. 19.

Таблица 18

Значение постоянной помещения B_{1000}

| Тип помещения | Описание помещения | Постоянная помещения, $B_{1000}, \text{м}^3$ |
|---------------|--|--|
| 1 | С небольшим количеством людей (металлообрабатывающие цехи, вентиляционные камеры, генераторные машинные залы, испытательные стенды и т. п.) | $\frac{V}{20}$ |
| 2 | С жесткой мебелью и большим количеством людей или с небольшим количеством людей и мягкой мебелью (лаборатории, кабинеты и т. п.) | $\frac{V}{10}$ |
| 3 | С большим количеством людей и мягкой мебелью (рабочие помещения зданий, управлений, залы конструкторских бюро, аудитории учебных заведений, библиотек и т. п.) | $\frac{V}{6}$ |

Таблица 19

Значения частотного множителя μ

| Объем помещения, м^3 | Частотный множитель для октавных полос со среднегеометрическими частотами, Гц | | | | | | | |
|-------------------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|
| | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| $V < 200$ | 0,8 | 0,75 | 0,7 | 0,8 | 1,0 | 1,4 | 1,8 | 2,5 |
| $V = 200 \dots 1000$ | 0,65 | 0,62 | 0,64 | 0,75 | 1,0 | 1,5 | 2,4 | 4,2 |
| $V > 1000$ | 0,5 | 0,5 | 0,55 | 0,7 | 1,0 | 1,6 | 3,0 | 6,0 |

Эквивалентная площадь звукопоглощения, м^2 ,

$$A_i = \frac{B_i \cdot S}{B_i + S} = \frac{B_i}{B_i/S + 1}. \quad (3.3.10)$$

Средний коэффициент звукопоглощения

$$\bar{\alpha}_i = \frac{B_i}{B_i + S}. \quad (3.3.11)$$

Величина суммарного добавочного поглощения, вносимого конструкцией звукопоглощающей облицовки, м^2 ,

$$\Delta A_i = \alpha_{\text{обл}_i} \cdot S_{\text{обл}}. \quad (3.3.12)$$

Эквивалентная площадь звукопоглощения поверхностями, не занятыми звукопоглощающей облицовкой, м^2 ,

$$A_{l_i} = \overline{\alpha}_i (S - S_{\text{обл}}). \quad (3.3.13)$$

Средний коэффициент поглощения акустически обработанного помещения

$$\overline{\alpha}_{l_i} = \frac{A_{l_i} + \Delta A_i}{S}. \quad (3.3.14)$$

Постоянная помещения после его акустической обработки, м²,

$$B_{l_i} = \frac{A_i + \Delta A_i}{1 - \overline{\alpha}_{l_i}}. \quad (3.3.15)$$

Величина снижения уровней звукового давления в производственном помещении:

$$\Delta L_i = 10 \lg \frac{B_{l_i}}{B_i}. \quad (3.3.16)$$

В выводе определить класс условий труда по шумовому фактору, исходя из требуемого снижения шума на рабочем месте в дБА. Предельно допустимые уровни звукового давления определить по табл. П.3. Классы условий труда по превышению ПДУ определить по табл. 20.

Таблица 20

Классы условий труда в зависимости от уровней шума на рабочем месте

| Производственный фактор | Класс условий труда | | | | | |
|---------------------------------------|--------------------------|---------|-----|-----|-----|---------|
| | допустимый | вредный | | | | опасный |
| | 2 | 3.1 | 3.2 | 3.3 | 3.4 | 4 |
| | Превышение ПДУ до ... дБ | | | | | |
| Шум, эквивалентный уровень звука, дБА | < ПДУ | 5 | 15 | 25 | 35 | > 35 |

Задача 3.3.3. Рассчитать резиновые виброизоляторы под вентиляционный агрегат, если вес агрегата P , число оборотов ротора вентилятора n_0 . Данные для расчета — в табл. 21.

Таблица 21

Исходные данные для расчета к задаче 3.3.3

| № варианта | P , Н | n , об/мин | № варианта | P , Н | n , об/мин |
|------------|---------|--------------|------------|---------|--------------|
| 1 | 10000 | 1200 | 6 | 7500 | 2400 |
| 2 | 12000 | 1500 | 7 | 8500 | 2500 |

Окончание табл. 21

| № варианта | P , Н | n , об/мин | № варианта | P , Н | n , об/мин |
|------------|---------|--------------|------------|---------|--------------|
| 3 | 11000 | 1800 | 8 | 14500 | 2000 |
| 4 | 13000 | 2000 | 9 | 10500 | 2300 |
| 5 | 9000 | 2100 | 10 | 13000 | 1700 |
| 6 | 11000 | 1100 | 21 | 7000 | 2300 |
| 7 | 13000 | 1400 | 22 | 8000 | 2400 |
| 8 | 10000 | 1700 | 23 | 14000 | 2100 |
| 9 | 14000 | 2100 | 24 | 10000 | 2200 |
| 10 | 9500 | 2200 | 25 | 13500 | 1800 |
| 11 | 9000 | 1250 | 26 | 8500 | 2450 |
| 12 | 13000 | 1600 | 27 | 9500 | 2600 |
| 13 | 14000 | 1900 | 28 | 15000 | 2200 |
| 14 | 12000 | 2100 | 29 | 11500 | 2250 |
| 15 | 9500 | 2200 | 30 | 15000 | 1600 |

На первом этапе расчета, определив частоту возбуждающей силы (основную оборотную частоту $f = n_0/60 \text{ с}^{-1}$, где n_0 — число оборотов ротора в минуту), находим допустимую собственную частоту системы:

$$f_0 = \frac{f}{m}, \quad (3.3.17)$$

где $m = 3...4$ — оптимальное соотношение между частотой возбуждения и собственной частотой колебаний системы, обеспечивающее достаточно эффективную виброизоляцию.

На втором этапе определяем необходимую площадь резиновых виброизоляторов:

$$S_{\Sigma} = \frac{P}{[G]}, \quad (3.3.18)$$

где $[G]$ — допускаемое напряжение в резине, равно $(3...5) \cdot 10^5 \text{ Па}$ (при твердости по Шору — 60 и модуле упругости $E_{\text{ст}} = 5 \cdot 10^6 \text{ Па}$).

Задав число виброизоляторов n , определяем площадь каждого из них по формуле:

$$S_i = \frac{S_{\Sigma}}{n}. \quad (3.3.19)$$

Далее — поперечный размер прокладки диаметр D или сторону квадрата B :

$$B = \sqrt{S}; \quad D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}. \quad (3.3.20)$$

Рабочая толщина виброизолятора

$$h_p = \frac{x_{\text{ст}} \cdot E_{\text{ст}}}{[G]}, \quad (3.3.21)$$

где $x_{\text{ст}}$ — статическая осадка амортизатора;

$$x_{\text{ст}} = \frac{g}{(2\pi f_0)^2}, \quad (3.3.22)$$

где g — ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; $E_{\text{ст}}$ — статический модуль упругости резины; $E_{\text{ст}} = (4...5) \cdot 10^6 \text{ Па}$.

Расчет полной толщины виброизолятора проводится по формуле:

$$h = h_p + \frac{B}{8}. \quad (3.3.23)$$

Если окажется, что $h > 1,2 B$, то нужно соответственно изменить число виброизоляторов или сорт резины и повторить расчет.

Расчет эффективности виброизоляции (дБ) проводится по формуле:

$$\Delta L = 20 \lg (1/\text{КП}), \quad (3.3.24)$$

где КП — коэффициент передачи, рассчитываемый по формуле:

$$\text{КП} = \frac{1}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 - 1}. \quad (3.3.25)$$

После проведения расчета — составить схему размещения виброизоляторов под основанием вентиляционной установки.

3.4. Электромагнитные поля

Электромагнитное поле (ЭМП) представляет особую форму материи. Всякая электрически заряженная частица окружена электромагнитным полем. Оно может существовать и в свободном состоянии в виде движущихся со скоростью $3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ фотонов или в виде электромагнитных волн.

Движущееся ЭМП (электромагнитное излучение — ЭМИ) характеризуется векторами **напряженности электрического** E , В/м, и **магнитного** H , А/м, **полей**, которые определяют силовые свойства ЭМП.

Длина волны λ , частота колебаний f и скорость распространения электромагнитных волн в воздухе c связаны соотношением $c = \lambda \cdot f$. Например, для промышленной частоты $f = 50$ Гц длина волны $\lambda = 3 \cdot 10^8 / 50 = 6000$ км, а для ультракоротких (УКВ) частот $f = 3 \cdot 10^8$ Гц длина волны равна 1 м.

В ЭМП существует три зоны, которые различаются по расстоянию от источника.

Зона индукции I (ближняя зона) имеет радиус $R \leq \lambda / 2\pi$. В этой зоне электромагнитная волна не сформирована, и поэтому на человека действует независимо друг от друга напряженность электрического и магнитного полей.

Зона интерференции II (промежуточная) имеет радиус $\lambda / 2\pi < R < 2\pi\lambda$. В этой зоне одновременно воздействуют на человека напряженность электрического и магнитного полей, а также энергетическая составляющая.

Зона излучения III (дальняя), имеющая радиус $R \geq 2\pi\lambda$, характеризуется тем, что это зона сформировавшейся электромагнитной волны. В этой зоне на человека воздействует только энергетическая составляющая, а векторы E и H всегда взаимно перпендикулярны. В вакууме и воздухе $E = 377 \cdot H$.

Для токов промышленных частот размер зон I и II составляет несколько десятков километров. Начиная со сверхвысоких частот, зона индукции уменьшается, и оценка осуществляется по характеристике S , для которой в нормативных документах принято название **плотность потока энергии** (ППЭ), хотя фактически это **плотность потока мощности**, Вт/м², которая в общем виде определяется векторным произведением E и H , а для сферических волн при распространении в воздухе может быть выражена как

$$S = \frac{P}{4\pi R^2}, \quad (3.4.1)$$

где P — мощность электромагнитного излучения в Вт.

Задача 3.4.1. Определить допустимую продолжительность работы в электростатическом поле без защитных средств, если фактическое значение напряженности поля ($E_{\text{факт}}$) составляет 30 кВ/м.

Задача 3.4.2. Определить допустимое время пребывания персонала без специальных средств защиты в электрическом поле промышленной частоты напряженностью 10 кВ/м.

Задача 3.4.3. Определить, в какой зоне ЭМП находится рабочее место, расположенное на расстоянии 5 м от источника, если частота излучения составляет $3 \cdot 10^8$ Гц. Какие параметры ЭМП нормируются для данного рабочего места?

Задача 3.4.4. Определить, в какой зоне ЭМП находится рабочее место, расположенное на расстоянии 1 м от источника, если частота излучения составляет 300 кГц. Какие параметры ЭМП нормируются для данного рабочего места?

Задача 3.4.5. Определить, в какой зоне ЭМП находится рабочее место, расположенное на расстоянии 0,6 м от источника, если частота излучения составляет 300 МГц. Какие параметры ЭМП нормируются для данного рабочего места?

Задача 3.4.6. Определить, в какой зоне ЭМП находится рабочее место, расположенное на расстоянии 2 м от источника, если частота излучения составляет 30 ГГц. Какие параметры ЭМП нормируются для данного рабочего места?

Задача 3.4.7. Определить плотность потока мощности S (Вт/м²) электромагнитного облучения мозга сотовым телефоном (частота излучения $f = 1,2$ ГГц), если мощность излучения $P = 1,256$ Вт. Принять расстояние $r = 0,1$ м, коэффициент усиления антенны $G = 1$ ¹⁾.

3.5. Радиационная безопасность

Быстрое развитие ядерной энергетики и широкое внедрение источников **ионизирующего излучения (ИИ)** в различных областях науки, техники и производства создали потенциальную угрозу радиационной опасности для человека и загрязнения окружающей среды **радиоактивными веществами (РВ)**. Поэтому вопросы защиты от ИИ превращаются в одну из важнейших проблем [20].

Эффективная защита населения от ИИ может быть организована в результате тщательного прогноза возможной радиационной обстановки на случай аварии на объектах ядерного топливного цикла (ЯТЦ) с выбросом РВ при правильной оценке фактической радиационной

¹⁾ Воспользоваться формулой: $S = \frac{P \cdot G}{4\pi R^2}$

обстановки в условиях произошедшей аварии, сопровождаемой радиоактивным загрязнением местности [21].

Под радиационной обстановкой понимают масштабы и степень загрязнения РВ местности, воздуха, людей, элементов инженерно-технических сооружений (ИТС) объекта экономики в результате аварии на объектах ЯТЦ с выбросом РВ.

Оценка радиационной обстановки производится с целью выявления масштабов и степени загрязнения местности, определения возможных последствий их воздействия и установления мер, обеспечивающих уменьшение опасности радиоактивного поражения людей.

Под фактической радиационной обстановкой понимается радиационная обстановка, выявленная по данным радиационной разведки об уровнях мощностей доз в отдельных точках местности [22].

При решении практических задач по оценке радиационной обстановки исходят из следующего.

1. Спад уровней радиации подчиняется определенной закономерности, которая с достаточной точностью описывается уравнением:

$$P_t = P_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n, \quad (3.5.1)$$

где P_t — уровень радиации в любой момент времени относительно времени выброса; P_0 — уровень радиации на какой-то момент времени t_0 (относительно времени выброса); $n = n(t)$ — показатель степени, который в зависимости от времени, прошедшего после выброса, принимает следующие значения:

| | | | |
|-----|------------------|------------------|----------------|
| t | 1 час — 15 суток | 15 сут. — 3 мес. | 3 мес. — 1 год |
| n | 0,3 | 0,4 | 0,5 |

На рис. 13 представлена графическая интерпретация уровня радиации в любой момент времени после начала заражения (3.5.1) [23].

2. Уровни радиации, как правило, приводятся ко времени 1 час после выброса радиоактивных веществ. Это действие необходимо при выборе режимов радиационной защиты при использовании нормативных таблиц.

Уровень радиации на 1 час после выброса можно рассчитать по формуле:

$$P_{1\text{час}} = P_0 \left(\frac{t}{1} \right)^n = P_0 \cdot t_0^n. \quad (3.5.2)$$

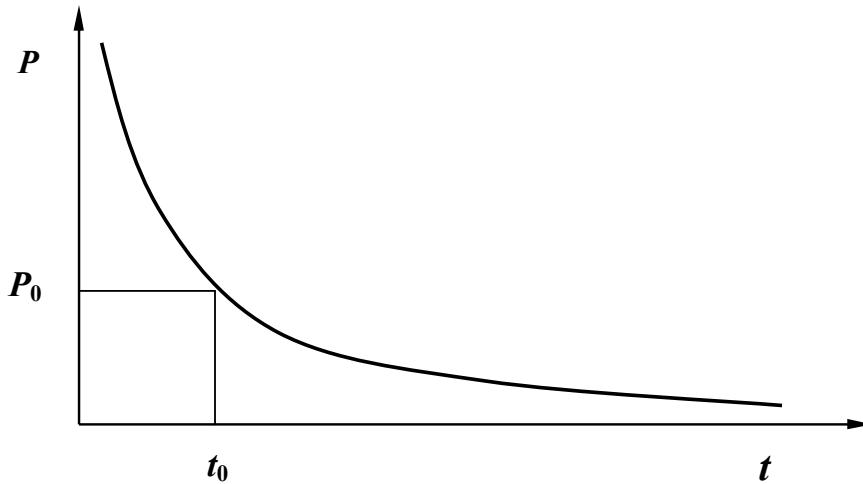


Рис. 13. Изменение уровня радиации на местности с течением времени

При этом расчет уровня радиации на любой другой момент времени, выраженный через $P_{1\text{час}}$, будет иметь вид:

$$P_t = \frac{P_{1\text{час}}}{t^n} = P_{1\text{час}} \cdot t^{-n}. \quad (3.5.3)$$

3. Во всех расчетах для оценки радиационной обстановки вводится единая система отсчета времени, привязанная к моменту времени выброса радиоактивных веществ ($t_{\text{выбр}}^*$) в часах и долях часа. Например, $t = 2 \text{ ч } 45' = 2,75 \text{ ч}$.

4. При решении задач вводятся следующие условные обозначения:

t — время, отсчитанное от $t_{\text{выбр}}^*$;

t^* — время астрономическое (по часам);

$t_{\text{выбр}}^*$ — время выброса (астрономическое);

$t_{\text{вх}}$ — время входа или начала работы на зараженной местности относительно времени выброса;

$t_{\text{вых}}$ — время выхода или окончания работы на зараженной местности относительно времени выброса;

T_p ($T_{\text{доп}}$) — продолжительность работы на загрязненном участке (допустимое время пребывания на загрязненном участке): $T_p = t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}$.

При этом данные временные отрезки рассчитываются следующим образом относительно времени выброса (рис. 14):

$$t = t^* - t_{\text{выбр}}^*; t_0 = t_0^* - t_{\text{выбр}}^*; t_{\text{вх}} = t_{\text{вх}}^* - t_{\text{выбр}}^*. \quad (3.5.4)$$

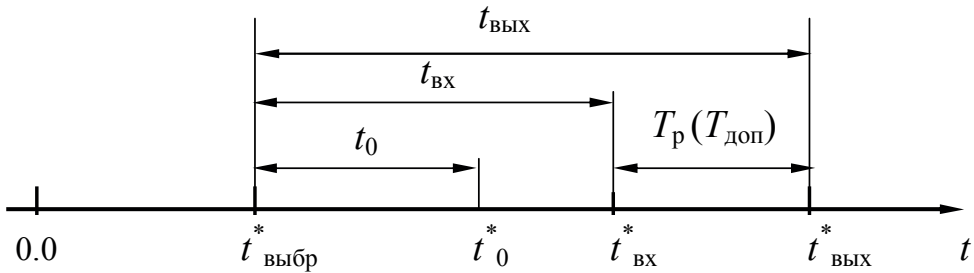


Рис. 14. Отсчет времени относительно времени выброса

Пример 3.5.1. Приведите уровни радиации к различным промежуткам времени относительно времени выброса по одному измерению в заданной точке. Выброс РВ на РО произошел в 10.00 05.07. Уровень радиации в районе цеха был измерен в 12.00 и составил 0,12 рад/ч. Определить уровень радиации на 1 час после аварии и на 7 часов после аварии.

Дано: $t^*_{\text{выбр}} = 10.00$; $t^*_0 = 12.00$; $P_0 = 0,12$ сГр/ч.

Определить: $P_{1\text{час}}$, $P_{7\text{час}}$.

Решение

1. Приводим время к единой системе отсчета относительно времени выброса:

$$t_0 = t^*_0 - t^*_{\text{выбр}} = 12.00 - 10.00 = 2 \text{ ч.}$$

2. Определяем уровень радиации на 1 час после выброса:

$$P_{1\text{час}} = P_0 t_0^n = 0,12 \cdot 2^{0,3} = 0,15 \text{ сГр/ч.}$$

3. Определяем уровень радиации на 7 часов после выброса:

$$P_t = P_{1\text{час}} t^{-n} = 0,15 \cdot 7^{-0,3} = 0,083 \text{ сГр/ч.}$$

Пример 3.5.2. Определить время выброса по двум измерениям уровня радиации, разнесенным по времени: P_{01} за t^*_{01} ; P_{02} за t^*_{02} .

$$t^*_{\text{выбр}} = t^*_{01} - t^*_{02}.$$

$$P_{1\text{час}} = P_{02} t_{02}^n,$$

$$P_{1\text{час}} = P_{01} t_{01}^n = t_{01} = t_{02} - \Delta t = t_{02} - (t^*_{02} - t^*_{01}),$$

$$P_{1\text{час}} = P_{01} [t_{02} - (t^*_{02} - t^*_{01})]^n.$$

$$t_{02} = \frac{t_{02}^* - t_{01}^*}{1 - \left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{1}{n}}}. \quad (3.5.5)$$

$$t_{\text{выбр}}^* = t_{02}^* - \frac{t_{02}^* - t_{01}^*}{1 - \left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{1}{n}}}. \quad (3.5.6)$$

В 10.00 уровень радиации в районе цеха, от которого произошло заражение, составлял 0,6 сГр/ч, а в 11.00 уровень радиации был 0,55 сГр/ч.

Дано:

$$t_{01}^* = 10.00; \quad P_{01} = 0,6 \text{ сГр/ч};$$

$$t_{02}^* = 11.00; \quad P_{02} = 0,55 \text{ сГр/ч}.$$

Расчет времени выброса:

$$t_{\text{выбр}}^* = t_{02}^* - \frac{t_{02}^* - t_{01}^*}{1 - \left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{1}{n}}} = 11.00 - \frac{11.00 - 10.00}{1 - \left(\frac{0,55}{0,6} \right)^{\frac{1}{0,3}}} = 7.$$

Вывод: выброс радиоактивных веществ в районе цеха произошел 7 часов назад.

Пример 3.5.3. Определить возможные дозы облучения при работе на загрязненной местности, если заданы:

- ♦ уровень радиации на 1 час после аварии;
- ♦ время входа на загрязненный участок;
- ♦ продолжительность работы на загрязненной местности;
- ♦ условия нахождения на загрязненной местности ($K_{\text{осл}}$).

Доза равна площади заштрихованной фигуры на рис. 15.

$$D = \frac{P_{\text{1 час}}}{K_{\text{осл}}} \int_{t_{\text{вх}}}^{t_{\text{вых}}} t^{-n} dt = \frac{P_{\text{1 час}}}{K_{\text{осл}} (1-n)} \left[t_{\text{вых}}^{(1-n)} - t_{\text{вх}}^{(1-n)} \right], \quad (3.5.7)$$

где $K_{\text{осл}}$ — **коэффициент ослабления**, показывающий, во сколько раз доза, которую получают рабочие, выполняющие работу на открытой местности, больше дозы, которую получают рабочие, выполняющие работу в укрытии (цех, здание, убежище):

$$K_{\text{осл}} = 2^{\frac{h}{d}},$$

где d — коэффициент половинного ослабления, h — толщина слоя вещества, ослабляющего излучение.

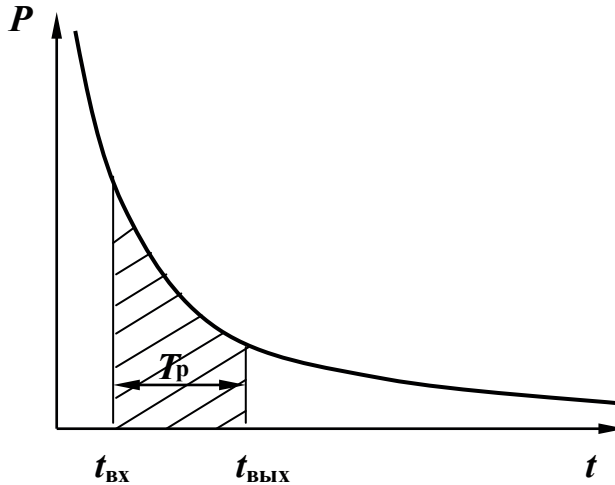


Рис. 15. Определение возможных доз облучения

При многослойном защитном перекрытии $K_{\text{осл}} = 2^{\left(\frac{h_1}{d_1} + \frac{h_2}{d_2} + \dots + \frac{h_n}{d_n}\right)}$.

Дано: $K_{\text{осл}} = 7$, уровень радиации на открытой местности на 12.00 ($t_0 = 12.00$ ч) после выброса составил $P_0 = 0,8$ сГр/ч. Начало работы $t_{\text{вх}} = 12.00$ ч после аварии, продолжительность работы $T_p = 6$ ч.

1. Уровень радиации на 1 час после выброса:

$$P_{1\text{час}} = P_0 \cdot t_0^n = 0,8 \cdot 12,00^{0,3} = 1,68 \text{ сГр/ч.}$$

2. Доза радиации, которую получают работники цеха:

$$D = \frac{P_0 t_0^n}{K_{\text{осл}}(1-n)} \left[t_{\text{вых}}^{(1-n)} - t_{\text{вх}}^{(1-n)} \right] = \frac{0,8 \cdot 12,00^{0,3}}{7(1-0,3)} \left[18^{(1-0,3)} - 12^{(1-0,3)} \right] = 0,64 \text{ сГр.}$$

Вывод: работники цеха за 6 часов работы получают дозу радиации 0,64 сГр.

Пример 3.5.4. Определить допустимую продолжительность пребывания людей на загрязненной радиоактивными веществами местности, если известно время входа ($t_{\text{вх}}$), уровень радиации на время входа ($P_{\text{вх}}$), задана допустимая доза ($D_{\text{зад}}$) и условия нахождения на местности ($K_{\text{осл}}$).

В этом случае уравнение (3.5.7), определяющее дозу внешнего облучения, решается относительно $t_{\text{вх}}$:

$$T_{\text{доп}} = t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}},$$

$$t_{\text{вых}} = \left(\frac{D_{\text{зад}} (1-n) K_{\text{осл}}}{P_{\text{вх}} t_{\text{вх}}^n} + t_{\text{вх}}^{(1-n)} \right)^{\frac{1}{1-n}} = t_{\text{вх}} \left(\frac{D_{\text{зад}} (1-n) K_{\text{осл}}}{P_{\text{вх}} t_{\text{вх}}} + 1 \right)^{\frac{1}{1-n}},$$

$$T_{\text{доп}} = t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}} = t_{\text{вх}} \left[\left(\frac{D_{\text{зад}} (1-n) K_{\text{осл}}}{P_{\text{вх}} t_{\text{вх}}} + 1 \right)^{\frac{1}{1-n}} - 1 \right] \text{ ч.} \quad (3.5.8)$$

Дано: уровень радиации через 6 часов после аварии ($t_0 = 6.00$ ч) $P_0 = 0,05$ сГр/ч; время входа на загрязненный участок $t_{\text{вх}} = 7.00$ ч; заданная доза $D_{\text{зад}} \leq 0,27$ сГр/ч. Работа на открытой местности ($K_{\text{осл}} = 1$).

На первом этапе определяем уровень радиации на время входа $P_{\text{вх}}$:

$$P_{\text{вх}} = P_0 \left(\frac{t_0}{t_{\text{вх}}} \right)^n = 0,05 \cdot (6,00 / 7,00)^{0,3} = 0,048 \text{ сГр/ч.}$$

На втором этапе рассчитываем допустимое время работы на загрязненной местности $T_{\text{доп}}$:

$$T_{\text{доп}} = t_{\text{вх}} \left[\left(\frac{D_{\text{зад}} (1-n) K_{\text{осл}}}{P_0 \left(\frac{t_0}{t_{\text{вх}}} \right)^n t_{\text{вх}}} + 1 \right)^{\frac{1}{1-n}} - 1 \right] = 7,00 \left[\left(\frac{0,27(1-0,3)}{0,05 \left(\frac{6,00}{7,00} \right)^{0,3} 7,00} + 1 \right)^{\frac{1}{1-0,3}} - 1 \right] = 6,28 \text{ ч}$$

Вывод: допустимая продолжительность пребывания людей на загрязненной местности составит 6,28 часа.

Пример 3.5.5. Определить дозы, полученные людьми при преодолении участка зараженной местности по известным в нескольких точках маршрута уровнях радиации, приведенных к 1 часу относительно аварии; времени прохождения середины маршрута относительно времени выброса; протяженности маршрута, скорости движения, способа преодоления.

Какую дозу получит рабочий 3–4 смены, если уровни радиации в точках загрязненной ячейки на маршруте движения в пересчете на 1 час составляют $P_1 = 0,014$; $P_2 = 0,12$; $P_3 = 1,3$; $P_4 = 1,1$; $P_5 = 0,8$; $P_6 = 0,02$ сГр/ч; расстояние маршрута составит $l = 40$ км; скорость дви-

жения на маршруте $V_{\text{дв}} = 30$ км/ч и коэффициент ослабления радиации при нахождении работника в транспортном средстве составит $K_{\text{осл.маш}} = 2$; $t_{\text{сер}} = 24$ ч.

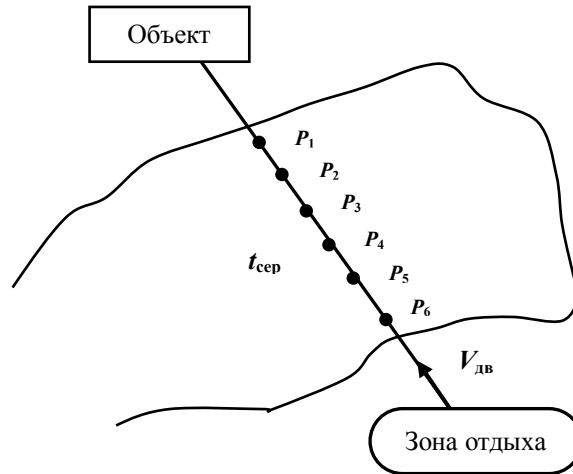


Рис. 16. Схема маршрута

$$D_{\text{марш.}} = \frac{P_{\text{ср}} \cdot t_{\text{сер}}^{-n} \cdot l}{K_{\text{осл}} \cdot V_{\text{дв}}} \quad (3.5.9)$$

На первом этапе определяем уровень радиации $P_{\text{ср}}$ в пересчете на 1 час.

$$P_{\text{ср1час}} = \frac{\sum_1^k P_i}{k} = \frac{0,014 + 0,12 + 1,3 + 1,1 + 0,8 + 0,02}{6} = 0,559 \text{ сГр/ч.}$$

Далее определяем дозу радиации, которую получают рабочие на маршруте движения $D_{\text{марш.}}$:

$$D_{\text{марш.}} = \frac{P_{\text{ср}} t_{\text{сер}}^{-n} \cdot l}{K_{\text{осл}} V_{\text{дв}}} = \frac{0,559 \cdot 24^{-0,3} \cdot 40}{2 \cdot 30} = 0,1438 \text{ рад.}$$

Вывод: рабочие за время прохождения маршрута через зону радиационного заражения получают дозу 0,1438 рад.

Пример 3.5.6. Определить время начала работы — $t_{\text{вх}}$ на зараженной ячейке местности при заданной дозе облучения $D_{\text{зад}}$, продолжительности работы T_p и условиях работы $K_{\text{осл}}$.

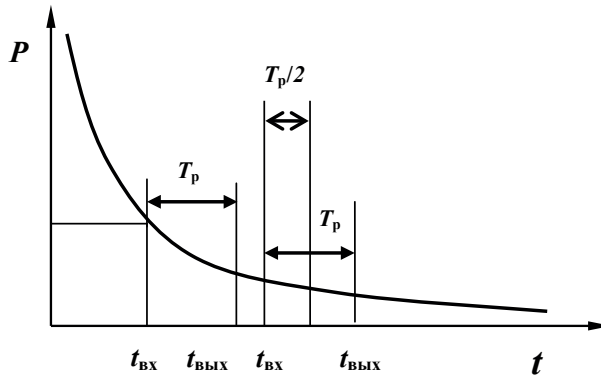


Рис. 17. Определение времени середины работы

$$D_{\text{марш.}} = \frac{P_{\text{ср1час}} t_{\text{сер}}^{-n} \cdot T_p}{K_{\text{осл}} V_{\text{дв}}} = \frac{P_{\text{ср}} t_{\text{сер}}^{-n} \cdot l}{K_{\text{осл}}}, \quad (3.5.10)$$

т. к. $T_p = \frac{l}{V_{\text{дв}}}.$

Решаем уравнение (3.5.10) относительно $t_{\text{сер}}$:

$$t_{\text{сер}} = \left(\frac{D_{\text{зад.}} K_{\text{осл}}}{P_{\text{ср1час}} T_p} \right)^{-\frac{1}{n}}; \quad t_{\text{вх}} = t_{\text{сер}} - \frac{T_p}{2}; \quad t_{\text{вых}} = \left(\frac{D_{\text{зад.}} K_{\text{осл}}}{P_{\text{1час}} T_p} \right)^{-\frac{1}{n}} - \frac{T_p}{2}. \quad (3.5.11)$$

Исходные данные для расчета: продолжительность работы $T_p = 6$ ч при уровне радиации на открытой местности $P_{\text{1час}} = 1$ сГр/ч. Задана доза облучения $D_{\text{зад}} \leq 0,5$ рад. Работа осуществляется в цехе с $K_{\text{осл}} = 7$.

$$t_{\text{вх}} = \left(\frac{D_{\text{зад.}} K_{\text{осл}}}{P_{\text{1час}} T_p} \right)^{-\frac{1}{n}} - \frac{T_p}{2} = \left(\frac{0,5 \cdot 7}{1 \cdot 6} \right)^{-\frac{1}{n}} - \frac{6}{2} = 3 \text{ ч.}$$

Вывод: время начала работ на объекте после радиационного выброса для заданных условий и дозы облучения (менее 0,5 рад) должно быть не ранее 3-х часов после аварии.

Задача 3.5.1. На РО в 15 ч 00' произошла авария с выбросами РВ. Уровень радиации $P_{\text{1час}} = 2,1$ сГр/ч. Определить:

1) дозу облучения, полученную рабочими на открытой площадке, если $t_{\text{вх}}^* = 17$ ч, продолжительность работы 2 ч;

2) допустимую продолжительность работы, если доза облучения не должна превышать 1,5 рад;

3) время начала работы для данных условий.

Задача 3.5.2. На РО в 17 ч 00' произошла авария с выбросом РВ. Уровень радиации $P_{\text{час}} = 1,8$ сГр/ч. Определить:

- 1) дозу облучения, полученную рабочими в помещении с $K_{\text{осл}} = 2$, если $t_{\text{вх}}^* = 19$ ч 00', продолжительность работы 4 ч;
- 2) допустимую продолжительность работы, если доза облучения не должна превышать 1 сГр;
- 3) время начала работы для данных условий.

Задача 3.5.3. На РО в 9 ч 15' произошла авария с выбросом РВ. Уровень радиации $P_{\text{час}} = 2,2$ сГр/ч. Определить:

- 1) дозу облучения, полученную рабочими в помещении с $K_{\text{осл}} = 3$, если $t_{\text{вх}}^* = 11$ ч 15', продолжительность работы 4 ч;
- 2) допустимую продолжительность работы, если доза облучения не должна превышать 1 сГр;
- 3) время начала работы для данных условий.

Задача 3.5.4. На РО произошла авария с выбросами РВ. Произведено два замера мощности дозы: $t_{01}^* = 8$ ч 30'; $t_{02}^* = 10$ ч 00'; $P_{01} = 1,2$ сГр/ч; $P_{02} = 1$ сГр/ч.

Определить:

- 1) дозу облучения, полученную рабочими на открытой площадке, если $t_{\text{вх}}^* = 10$ ч, продолжительность работы составила 5 ч;
- 2) допустимую продолжительность работы, если доза облучения не должна превышать 3,0 сГр;
- 3) время начала работы для данных условий.

Задача 3.5.5. На РО произошла авария с выбросами РВ. Произведено два замера мощности дозы: $t_{01}^* = 3$ ч 30'; $t_{02}^* = 5$ ч 30'; $P_{01} = 1,8$ сГр/ч; $P_{02} = 1,7$ сГр/ч.

Определить:

- 1) дозу облучения, полученную рабочими в помещении с $K_{\text{осл}} = 2$, если $t_{\text{вх}}^* = 8$ ч, продолжительность работы составила 4 ч;
- 2) допустимую продолжительность работы, если доза облучения не должна превышать 3,0 сГр;
- 3) время начала работы для данных условий.

Задача 3.5.6. На РО произошла авария с выбросом РВ. Произведено два замера мощности дозы: $t_{01}^* = 9$ ч 30'; $t_{02}^* = 11$ ч 30'; $P_{01} = 2,1$ сГр/ч; $P_{02} = 1,9$ сГр/ч.

Определить:

- 1) дозу облучения, полученную рабочими в помещении с $K_{\text{осл}} = 2$, если $t_{\text{вх}}^* = 5$ ч 00', продолжительность работы составила 2 ч;

2) допустимую продолжительность работы, если доза облучения не должна превышать 2,0 сГр;

3) время начала работы для данных условий.

Задача 3.5.7. На РО произошла авария с выбросами РВ. Произведено два замера мощности дозы: $t_{01}^* = 10 \text{ ч } 30'$; $t_{02}^* = 14 \text{ ч } 30'$; $P_{01} = 1,8 \text{ сГр/ч}$; $P_{02} = 1,7 \text{ сГр/ч}$. Определить:

1) дозу облучения, полученную рабочими на открытой местности, если $t_{\text{вх}}^* = 7 \text{ ч}$, продолжительность работы составила 3 ч;

2) допустимую продолжительность работы, если доза облучения не должна превышать 5,0 сГр;

3) время начала работы для данных условий.

Задача 3.5.8. На РО произошла авария с выбросом РВ. Произведено два замера мощности дозы: $t_{01}^* = 14 \text{ ч } 00'$; $t_{02}^* = 16 \text{ ч } 30'$; $P_{01} = 2,1 \text{ сГр/ч}$; $P_{02} = 1,9 \text{ сГр/ч}$. Определить:

1) дозу облучения, полученную рабочими в помещении с $K_{\text{осл}} = 3,0$, если $t_{\text{вх}}^* = 10 \text{ ч}$, продолжительность работы 2 ч;

2) допустимую продолжительность работы, если доза облучения не должна превышать 1 сГр;

3) время начала работы для данных условий.

Задача 3.5.9. На РО произошла авария с выбросом РВ. Произведено два замера мощности дозы: $t_{01}^* = 16 \text{ ч } 30'$; $t_{02}^* = 18 \text{ ч } 00'$; $P_{01} = 1,7 \text{ сГр/ч}$; $P_{02} = 1,5 \text{ сГр/ч}$. Определить:

1) дозу облучения, полученную рабочими на открытой площадке, если $t_{\text{вх}}^* = 17 \text{ ч}$, продолжительность работы 4 ч;

2) допустимую продолжительность работы, если доза облучения не должна превышать 5 сГр;

3) время начала работы для данных условий.

Задача 3.5.10. На РО в 10 ч 30' произошла авария с выбросом РВ. В 12 ч 30' произведен замер мощности дозы, которая составила 2,1 сГр/ч. Определить:

1) дозу облучения, полученную рабочими в помещении с $K_{\text{осл}} = 3$, если $t_{\text{вх}}^* = 8 \text{ ч}$, продолжительность работы 4 ч;

2) допустимую продолжительность работы, если доза облучения не должна превышать 2 сГр;

3) время начала работы для данных условий.

Задача 3.5.11. На РО в 5 ч 30' произошла авария с выбросом РВ. В 8 ч 00' произведен замер уровня радиации, который составил 2,4 сГр/ч. Определить:

1) дозу облучения, полученную рабочими на открытой площадке, если $t_{\text{вх}}^* = 10 \text{ ч } 00'$, продолжительность работы 3 ч;

2) допустимую продолжительность работы, если доза облучения не должна превышать 5 сГр;

3) время начала работы для данных условий.

Задача 3.5.12. На РО в 7 ч 30' произошла авария с выбросом РВ. Произведен замер мощности дозы в 9 ч 00', которая составила 2,1 сГр/ч. Определить:

1) дозу облучения, полученную рабочими в помещении с $K_{\text{осл}} = 2$, если $t_{\text{вх}}^* = 9 \text{ ч } 00'$, продолжительность работы 4 ч;

2) допустимую продолжительность работы, если доза облучения не должна превышать 2 сГр;

3) время начала работы для данных условий.

Задача 3.5.13. На РО в 3 ч 30' произошла авария с выбросом РВ. В 6 ч 00' произведен замер мощности дозы, которая составила 1,8 сГр/ч. Определить:

1) дозу облучения, полученную рабочими в помещении с $K_{\text{осл}} = 2$, если $t_{\text{вх}}^* = 12 \text{ ч } 00'$, продолжительность работы 6 ч;

2) допустимую продолжительность работы, если доза облучения не должна превышать 4 сГр;

3) время начала работы для данных условий.

3.6. Электробезопасность

Согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ), установлены три класса помещений по опасности поражения электрическим током:

| | |
|--------------------------|---|
| Без повышенной опасности | В помещении отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность (см. п. 2 и 3) |
| С повышенной опасностью | Наличие одного из следующих признаков: 1) сырость (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %); 2) токопроводящая пыль (металлическая, угольная и т. п.); 3) токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т. п.); |

| | |
|-------------------------|---|
| С повышенной опасностью | <p>4) высокая температура (температура длительно превышает +35 °С);</p> <p>5) возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т. п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования — с другой</p> |
| Особо опасные | <p>Характеризуются наличием:</p> <p>1) особой сырости: влажность воздуха близка к 100 %;</p> <p>2) химически активной или органической среды (агрессивные пары, газы, жидкости, разрушающие изоляцию и токоведущие части электрооборудования);</p> <p>3) одновременно двух или более условий повышенной опасности</p> |

Пример. Определить класс опасности помещения по поражению электротоком в соответствии с ПУЭ при следующих условиях (ответ обосновать):

| Вид пола | Влажность | Наличие токо-проводящей пыли | Температура | Химически активная среда | Возможность одновременно-го прикосновения к металлическим корпусам оборудования и имеющим соединение с землей металлоконструкциям |
|----------|-----------|------------------------------|-------------|--------------------------|---|
| Кафель | 100 % | нет | 30 °С | нет | нет |

Класс опасности помещения — особо опасное.

Признаки: наличие особой влажности 100 %.

Задача 3.6.1. Определить класс помещения по опасности поражения электротоком в соответствии с ПУЭ при условиях, указанных в конкретном варианте задания (табл. 22). Ответ обосновать, привести все факторы, влияющие на класс опасности поражения электрическим током.

Таблица 22

Варианты заданий для определения класса опасности поражения током

| Вариант 1 | | | | | |
|------------|-----------|------------------------------|-------------|--------------------------|--|
| Вид пола | Влажность | Наличие токо-проводящей пыли | Температура | Химически активная среда | Возможность одновременного прикосновения к металлическим корпусам оборудования и имеющим соединение с землей металлоконструкциям |
| Деревянный | 70 % | Есть | 25 °С | Нет | Нет |
| Вариант 2 | | | | | |
| Вид пола | Влажность | Наличие токо-проводящей пыли | Температура | Химически активная среда | Возможность одновременного прикосновения к металлическим корпусам оборудования и имеющим соединение с землей металлоконструкциям |
| Кафель | 80 % | Нет | 25 °С | Нет | Нет |
| Вариант 3 | | | | | |
| Вид пола | Влажность | Наличие токо-проводящей пыли | Температура | Химически активная среда | Возможность одновременного прикосновения к металлическим корпусам оборудования и имеющим соединение с землей металлоконструкциям |
| Бетон | 76 % | Есть | 25 °С | Нет | Нет |
| Вариант 4 | | | | | |
| Вид пола | Влажность | Наличие токо-проводящей пыли | Температура | Химически активная среда | Возможность одновременного прикосновения к металлическим корпусам оборудования и имеющим соединение с землей металлоконструкциям |
| Деревянный | 80 % | Нет | 25 °С | Нет | Есть |

Окончание табл. 22

| Вариант 5 | | | | | |
|-----------|-----------|------------------------------|-------------|--------------------------|--|
| Вид пола | Влажность | Наличие токо-проводящей пыли | Температура | Химически активная среда | Возможность одновременного прикосновения к металлическим корпусам оборудования и имеющим соединение с землей металлоконструкциям |
| Кафель | 60 % | Нет | 25 °С | Есть | Нет |
| Вариант 6 | | | | | |
| Вид пола | Влажность | Наличие токо-проводящей пыли | Температура | Химически активная среда | Возможность одновременного прикосновения к металлическим корпусам оборудования и имеющим соединение с землей металлоконструкциям |
| Кафель | 100 % | Нет | 25 °С | Нет | Нет |

Напряжение шага $U_{\text{ш}}$ (рис. 18) — это разность потенциалов, обусловленная растеканием тока замыкания I_3 на землю, между точками цепи, находящимися на расстоянии шага a , которых одновременно касается ногами человек.

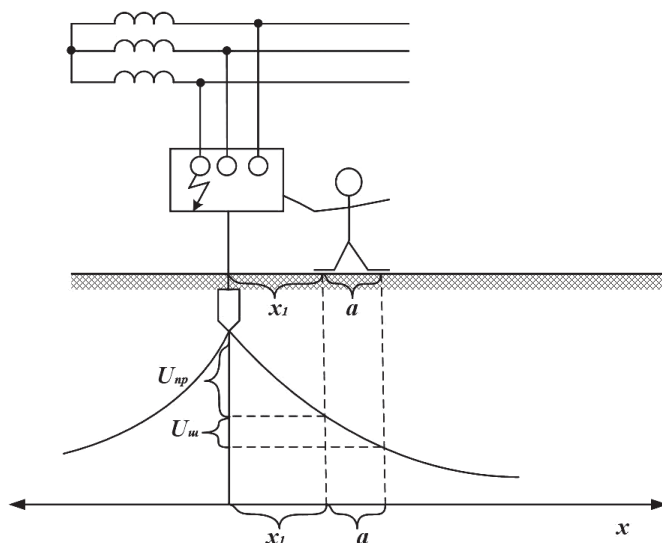


Рис. 18. Схема возникновения напряжения прикосновения и шагового напряжения

$$\begin{aligned}\varphi_{x_1} &= \frac{I_3 \rho}{2\pi x_1}; \quad \varphi_{x_1+a} = \frac{I_3 \rho}{2\pi(x_1+a)}; \\ U_{\text{ш}} &= \varphi_{x_1} - \varphi_{x_1+a} = \varphi_3 \cdot \beta_{\text{ш}}; \\ \beta_{\text{ш}} &= \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_1+a} \right) r = \frac{a \cdot r}{x_1(x_1+a)},\end{aligned}\tag{3.6.1}$$

где $\beta_{\text{ш}}$ — коэффициент шагового напряжения.

Напряжение шага зависит от потенциала замыкания и удельного сопротивления грунта, а также расстояния от заземлителя и ширины шага.

Напряжение шага максимально у заземлителя и уменьшается по мере удаления от заземлителя; вне поля растекания оно равно нулю.

Ток, обусловленный напряжением шага,

$$I_h = \frac{U_{\text{ш}}}{R_h}.\tag{3.6.2}$$

Задача 3.6.2. Определить величину шагового напряжения на расстоянии $x_1 = 2$ м от точки замыкания, если ток замыкания на землю $I_3 = 50$ А. Ширину шага принять $a = 1$ м, удельное сопротивление грунта $\rho = 100$ Ом·м. Чему равен в этом случае ток через человека? Чему будет равно шаговое напряжение на расстоянии 10 м при заданных условиях?

3.7. Производственный травматизм

Коэффициент частоты ($K_{\text{ч}}$) — количество несчастных случаев, происходящих на 1000 работающих:

$$K_{\text{ч}} = \frac{T}{P} 1000,\tag{3.7.1}$$

где T — количество несчастных случаев, произошедших за определенный период времени; P — среднесписочное число трудящихся в тот же период времени.

Коэффициент частоты обычно определяется по общему числу подлежащих учету несчастных случаев, а также по травматизму со смертельным исходом [24].

Коэффициент тяжести (K_T) — количество дней нетрудоспособности, приходящихся на один несчастный случай:

$$K_T = \frac{Д}{T}, \quad (3.7.2)$$

где $Д$ — общее число дней нетрудоспособности травмированных, временная трудоспособность которых закончилась в отчетном периоде.

Коэффициент опасности производства ($K_{оп}$) — интегральный коэффициент, характеризующий опасность потери здоровья на данном производстве:

$$K_{оп} = K_q \cdot K_T = \frac{Д}{P} 1000. \quad (3.7.3)$$

Данный показатель позволяет производить комплексную оценку состояния травматизма в целях принятия решения о возмещении ущерба здоровью пострадавших лиц. Этот показатель называют также коэффициентом нетрудоспособности, так как он равен числу дней нетрудоспособности, приходящихся на 1000 работающих.

Пример 3.7.1. Коэффициент частоты производственного травматизма для подразделения за отчетный период составил 4,3. Чему равен риск получения травмы работником данного подразделения за указанный период времени?

$$R = \frac{N}{P} = \frac{K_q}{1000} = 4,3 \cdot 10^{-3}.$$

Вывод: риск получения травмы в данном подразделении равен $4,3 \cdot 10^{-3}$.

Задача 3.7.1. Определить коэффициент частоты и тяжести производственного травматизма для предприятия, в котором: среднесписочное число работающих за отчетный период $P = 10\,000$ чел, количество несчастных случаев на производстве $N = 50$ и общее число дней нетрудоспособности $Д = 750$.

Задача 3.7.2. Рассчитать показатели производственного травматизма по кварталам и за год. Исходные данные приведены в табл. 23. Построить график динамики травматизма за указанный период. Определить риск получения производственной травмы работником данного подразделения.

Таблица 23

Исходные данные для задачи 3.6.2

| Вариант 1 | | | |
|-----------|-----------------------------|---|------------------------------------|
| Квартал | Число работающих P , чел. | Количество дней нетрудоспособности D , дней | Количество несчастных случаев, T |
| 1 | 1555 | 25 | 6 |
| 2 | 1455 | 11 | 3 |
| 3 | 1245 | 8 | 2 |
| 4 | 1345 | 15 | 2 |
| Вариант 2 | | | |
| Квартал | Число работающих P , чел. | Количество дней нетрудоспособности D , дней | Количество несчастных случаев, T |
| 1 | 2543 | 62 | 14 |
| 2 | 2453 | 42 | 13 |
| 3 | 2253 | 35 | 10 |
| 4 | 2322 | 51 | 12 |
| Вариант 3 | | | |
| Квартал | Число работающих P , чел. | Количество дней нетрудоспособности D , дней | Количество несчастных случаев, T |
| 1 | 2555 | 25 | 16 |
| 2 | 2455 | 11 | 13 |
| 3 | 2245 | 8 | 12 |
| 4 | 2345 | 15 | 12 |
| Вариант 4 | | | |
| Квартал | Число работающих P , чел. | Количество дней нетрудоспособности D , дней | Количество несчастных случаев, T |
| 1 | 1543 | 62 | 4 |
| 2 | 1453 | 42 | 3 |
| 3 | 1253 | 35 | 5 |
| 4 | 1322 | 51 | 2 |
| Вариант 5 | | | |
| Квартал | Число работающих P , чел. | Количество дней нетрудоспособности D , дней | Количество несчастных случаев, T |
| 1 | 1155 | 21 | 6 |
| 2 | 1155 | 11 | 3 |
| 3 | 1145 | 8 | 2 |
| 4 | 1145 | 11 | 2 |

Окончание табл. 23

| Вариант 6 | | | |
|-----------|-----------------------------|---|------------------------------------|
| Квартал | Число работающих P , чел. | Количество дней нетрудоспособности D , дней | Количество несчастных случаев, T |
| 1 | 2143 | 65 | 14 |
| 2 | 2153 | 45 | 13 |
| 3 | 2153 | 35 | 10 |
| 4 | 2122 | 55 | 12 |
| Вариант 7 | | | |
| Квартал | Число работающих P , чел. | Количество дней нетрудоспособности D , дней | Количество несчастных случаев, T |
| 1 | 2255 | 24 | 16 |
| 2 | 2255 | 14 | 13 |
| 3 | 2245 | 8 | 12 |
| 4 | 2245 | 14 | 12 |
| Вариант 8 | | | |
| Квартал | Число работающих P , чел. | Количество дней нетрудоспособности D , дней | Количество несчастных случаев, T |
| 1 | 1243 | 63 | 4 |
| 2 | 1253 | 43 | 3 |
| 3 | 1253 | 33 | 5 |
| 4 | 1222 | 53 | 2 |

Вопросы

1. Как определить кратность воздухообмена, необходимую для удаления выбросов вредных веществ в рабочей зоне?
2. Как можно улучшить микроклимат в рабочей зоне при выделении в нее избыточного тепла?
3. Как можно оценить световую среду в производственном помещении?
4. Какие параметры используются для оценки шума и вибрации в производственных помещениях?
5. Как можно защититься от избыточного шума в производственном помещении?
6. Как можно оценить эффективность виброзащиты рабочей зоны?
7. Как можно оценить опасность электромагнитного излучения?
8. Как можно оценить опасность радиационного поражения персонала?

ГЛАВА 4. ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ

4.1. Взрывопожарная безопасность

4.1.1. Показатели взрыво- и пожароопасности веществ

Область составов и смесей горючих газов и паров с воздухом, концентрации которых лежат между нижним и верхним пределами воспламенения, называется областью воспламенения.

На рис. 19 схематически показаны **верхний и нижний концентрационные пределы распространения пламени (ВКПР и НКПР)**. Горение возможно в области составов между НКПР и ВКПР, называемой областью воспламенения. Вне этой области концентраций распространение пламени невозможно.

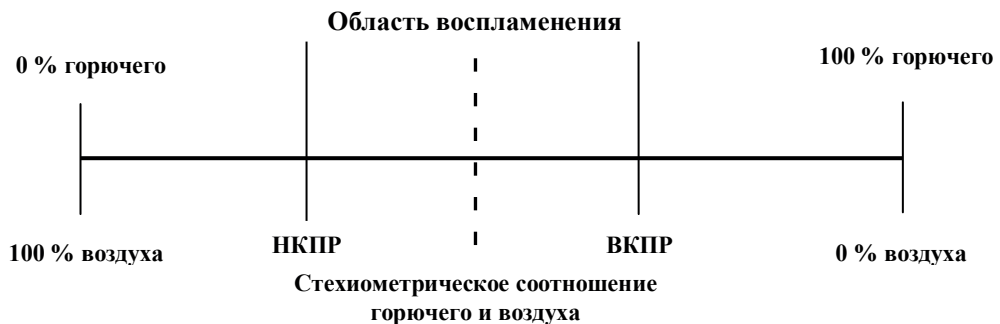


Рис. 19. Схема концентрационных пределов распространения пламени

Концентрационные пределы распространения пламени непостоянны и зависят от ряда факторов. Наибольшее влияние на данные пределы оказывают тепловая мощность источника воспламенения, примеси инертных газов и паров, температура окружающей среды и давление горючей смеси.

Для многокомпонентных горючих смесей расчет пределов (в процентах) производится по правилу Ле-Шателье:

$$\varphi = \frac{100}{\left(\frac{c_1}{\varphi_1} + \frac{c_2}{\varphi_2} + \dots + \frac{c_n}{\varphi_n}\right)}, \quad (4.1.1)$$

где φ — предел воспламенения (верхний или нижний); c_1, c_2, \dots, c_n — содержание горючих компонентов в % от суммарного содержания горючих компонентов, т.е. $c_1 + c_2 + \dots + c_n = 100\%$; $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ — соответствующие (верхние или нижние) пределы воспламенения горючих компонентов в %.

Легковоспламеняющиеся и горючие жидкости. Горение жидкостей происходит только в паровой фазе. Скорость испарения и количество паров над жидкостью зависят от природы жидкости, давления и ее температуры. Значения температуры жидкости, при которых концентрация насыщенных паров в воздухе над жидкостью равна концентрационным пределам воспламенения, называются **температурными пределами воспламенения** (нижним и верхним соответственно) [25].

Процесс воспламенения и горения жидкости можно представить следующим образом. Во-первых, для возникновения пламени необходимо нагреть жидкость до температуры не меньшей, чем нижний температурный предел воспламенения. Во-вторых, необходим источник воспламенения, который инициирует процесс горения. В-третьих, после воспламенения скорость испарения жидкости должна быть достаточной для поддержания процесса постоянного горения. Эти особенности для горючих жидкостей характеризуются температурами вспышки и воспламенения.

Температурой вспышки (t_v) называется наименьшее значение температуры жидкости, при которой над ее поверхностью образуется паровоздушная смесь, способная вспыхнуть от постороннего источника зажигания. Устойчивого горения жидкости при этой температуре не возникает, так как скорость испарения недостаточна для поддержания данного процесса.

По температуре вспышки все жидкости делят на **легковоспламеняющиеся (ЛВЖ)** — обладают $t_v < 61\text{ }^\circ\text{C}$ (спирты, ацетон, бензол и др.) и **горючие (ГЖ)** — имеют $t_v > 61\text{ }^\circ\text{C}$ (масла, мазуты, глицерин и др.).

Температурой воспламенения называется наименьшее значение температуры жидкости, при которой интенсивность испарения ее такова, что после ее поджога от внешнего источника возникает самостоятельное пламенное горение. Для легковоспламеняющихся жидкостей температура воспламенения обычно на $1...5\text{ }^\circ\text{C}$ выше температуры вспышки, а для горючих жидкостей эта разница может достигать от 30 до $35\text{ }^\circ\text{C}$.

Все смеси паров горючих жидкостей с воздухом, так же как и все смеси горючих газов с воздухом, являются взрывоопасными. Наиболее опасны смеси с концентрациями, близкими к стехиометрическим (см. рис. 19).

Пример 4.1.1. Оценить, возможно ли образование взрывоопасной концентрации паров ЛВЖ в производственном помещении.

Задано:

- ◇ в производственном помещении объемом 35 м^3 при $T = 293\text{ К}$ полностью испарился разлитый ацетон объемом 5 л;
- ◇ пары ацетона считать идеальным газом;
- ◇ солярная масса ацетона $M = 58,08\text{ кг}\cdot\text{кмоль}$;
- ◇ плотность жидкого ацетона $\rho = 790\text{ кг/м}^3$;
- ◇ объем 1 кмоль идеального газа при $T = 293\text{ К}$ равен $V_0 = 22,4\text{ м}^3/\text{кмоль}$;
- ◇ концентрационные пределы воспламенения ацетона 2,9...13 % об.

Решение

1. Определяем массу разлитой жидкости:

$$M_{\text{ж}} = \rho_{\text{ж}} \cdot V_{\text{ж}} = 790 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 3,95\text{ кг}.$$

Определяем плотность паров ЛВЖ:

$$\rho_n = \frac{M_{\text{ж}}}{V_0} = \frac{58,08}{22,4} = 2,59\text{ кг/м}^3.$$

2. Вычисляем объем паров ЛВЖ (учитывая, что $M_n = M_{\text{ж}}$):

$$V_{\text{пар}} = \frac{M_{\text{ж}}}{\rho_n} = \frac{3,95}{2,59} = 1,53\text{ м}^3.$$

Процентное содержание паров ЛВЖ в объеме помещения:

$$\varphi = \frac{V_{\text{пар}}}{V_n} \cdot 100\% = \frac{1,53}{35} \cdot 100\% = 4,37\%.$$

Вывод: при полном испарении разлитого ацетона концентрация его паров в воздухе будет взрывоопасной, так как $2,9 < 4,37 < 13$, т. е. попадает в концентрационные пределы воспламенения ацетона.

Задача 4.1.1. Возможен ли взрыв в помещении объемом $V_{\text{п}}, \text{м}^3$, если при $T = 293 \text{ К}$ в нем полностью испарилась разлитая легковоспламеняющаяся жидкость объемом $V_{\text{ж}}$? Исходные данные — в табл. 24. Считать пары ЛВЖ идеальным газом.

Таблица 24

Исходные данные для расчета к задаче 4.1.1

| Параметр | Обозначение | Размерность | Варианты | | | | | | | | | |
|--|---|-------------------|----------|------------|----------|--------|--------|---------|------------|--------|--------|---------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Вид ЛВЖ | — | — | спирт | этилацетат | бензол | ацетон | толуол | бензин | этилацетат | спирт | ацетон | бензин |
| Объем разлитой ЛВЖ | $V_{\text{ж}}$ | литр | 10 | 3 | 15 | 5 | 2 | 5 | 6 | 2 | 4 | 12 |
| Объем помещения | $V_{\text{п}}$ | м^3 | 35 | 30 | 40 | 45 | 40 | 40 | 32 | 36 | 40 | 48 |
| Молекулярная масса ЛВЖ | M | кг/кмоль | 46 | 88 | 78 | 58,08 | 92,14 | 98 | 88 | 46 | 58,08 | 98 |
| Плотность жидкости | $\rho_{\text{ж}}$ | кг/м ³ | 790 | 900 | 880 | 790 | 870 | 750 | 900 | 790 | 790 | 750 |
| Концентрационные пределы воспламенения паров ЛВЖ | $\varphi_{\text{н}} \dots \varphi_{\text{в}}$ | % об. | 3,6–19 | 3,0–11,4 | 1,43–9,5 | 2,9–13 | 1,25–7 | 1,9–5,1 | 3,0–11,4 | 3,6–19 | 2,9–13 | 1,9–5,1 |

Задача 4.1.2. Определить пределы взрываемости смеси газов следующего состава:

| | | | |
|---------------------------|-------------|------------|-----------|
| Компонент смеси | Метан | Пропан | Бутан |
| Содержание в смеси, % об. | 55 | 35 | 10 |
| Пределы взрываемости | 5,28...15,4 | 2,31...9,5 | 1,8...8,5 |

Указание: воспользоваться формулой Ле-Шателье.

4.1.2. Определение категории пожарной опасности помещений

В зависимости от количества и типа горючих и трудногорючих веществ все помещения принято делить на пять категорий по взрывопожарной и пожарной опасности согласно «Техническому регламенту о пожарной безопасности» № 123-ФЗ:

| | |
|--|---|
| А Повышенная взрывопожароопасность | Горючие газы, легковоспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки не более 28 °С в таком количестве, что они могут образовывать взрывоопасные паровоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа |
| Б Взрывопожароопасность | Горючие пыли и волокна, легковоспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки более 28 °С, горючие жидкости в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные пылевоздушные или паровоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа |
| В1–В4* Пожароопасные | Горючие и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть |
| Г Умеренная пожароопасность | Горючие вещества, используемые для нагрева и расплавления материалов. Нагретые и расплавленные материалы |
| Д Пониженная пожароопасность | Негорючие вещества и материалы в холодном состоянии |

*Определение пожарной категории В1–В4 осуществляется путем сравнения максимального значения удельной временной пожарной нагрузки на любом из участков производственного помещения с ее нормативным значением.

Пример 4.1.2. Определить пожарную категорию В1–В4 производственного помещения путем расчета удельной временной пожарной нагрузки. В помещении размещен аппарат с трудногорючей жидкостью в количестве $G = 45$ кг. Теплота сгорания ГЖ $Q_p = 41,87$ МДж/кг. Площадь размещения пожарной нагрузки при аварийном проливе 22,5 м². Определить категорию и подкатегорию пожарной опасности помещения.

Решение

1. Так как в помещении присутствует трудногорючая жидкость, то помещение было отнесено к пожароопасной категории В.

2. Для определения подкатегории рассчитываем пожарную нагрузку в горючих веществ помещений:

$$Q = G \cdot Q^p_n = 45 \cdot 41,87 = 1884,15 \text{ МДж.}$$

3. Удельная пожарная нагрузка составит:

$$q = \frac{Q}{S} = \frac{1884,15}{22,5} = 83,74 \text{ МДж/м}^2.$$

Вывод: это помещение должно быть отнесено к категории В4 в соответствии со следующими нормативами:

| Категория помещения | Удельная пожарная нагрузка q на участке, МДж/м ² |
|---------------------|---|
| В1 | Более 2200 |
| В2 | 1401–2200 |
| В3 | 181–1400 |
| В4 | 1–180 |

Задача 4.1.3. В помещении площадью S , м², размещены горючие материалы в количестве G , кг. Теплота сгорания горючих материалов Q^p_n , МДж/кг. Определить категорию и подкатегорию пожарной опасности помещения. Исходные данные приведены в табл. 25.

Таблица 25

Исходные данные для задачи 4.1.3

| Параметр | Обозначение | Размерность | Варианты | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------------|----------------|----------|--------|--------|------|---------|------|--------|--------|------|---------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Горючее вещество | — | — | ГЖ | дерево | бумага | ТГЖ | пластик | ГЖ | дерево | бумага | ТГЖ | пластик |
| Кол-во | G | кг | 27 | 31 | 122 | 180 | 24 | 450 | 290 | 280 | 230 | 210 |
| Теплота сгорания горючих материалов | Q^p_n | МДж/кг | 33,7 | 13,8 | 13,7 | 23,8 | 23,4 | 43,8 | 13,4 | 13,8 | 23,7 | 33,8 |
| Площадь помещения | S | м ² | 70 | 65 | 60 | 75 | 20 | 90 | 80 | 80 | 70 | 55 |

4.2. Определение степени разрушения зданий и сооружений при взрыве

В производстве в большом количестве используются приборы, аппараты, технологические процессы, содержащие вещества, способные при определенных условиях образовывать взрывоопасную среду [26].

Взрыв при возгорании газозооушной, парозооушной или пыле-зооушной смесей наступает при определенном содержании этих веществ в воздухе. Первичным поражающим фактором взрыва является ударная волна. Действие ударной волны на объект характеризуется сложным комплексом нагрузок: избыточным давлением, давлением скоростного напора, давлением затекания и т. д. Значение этих параметров зависит в основном от массы горючих или взрывчатых веществ, их вида, концентрации веществ в смеси с воздухом, расстояния от того или иного элемента инженерно-технического комплекса, его архитектурно-строительной характеристики и ряда других факторов. Учесть все эти факторы в совокупности невозможно, поэтому сопротивляемость зданий и сооружений действию ударной волны принято характеризовать только одним параметром, а именно избыточным давлением во фронте ударной волны — ΔP_{ϕ} [27].

Избыточное давление во фронте ударной волны (ΔP_{ϕ}) — это разность между максимальным давлением во фронте ударной волны и нормальным атмосферным давлением перед этим фронтом. Степени разрушения строительных конструкций, оборудования, машин и коммуникаций, а также поражение людей зависят в основном от избыточного давления.

Расчеты оценки действия взрыва в первом приближении, как правило, сводятся к определению избыточного давления во фронте ударной волны (ΔP_{ϕ}) на определенном расстоянии (R) от точки взрыва заданного количества (Q) взрывоопасной смеси. Количество взрывоопасной смеси и ее вид мы задаем, исходя из параметров веществ, хранящихся на производственной площадке. Это могут быть баллоны с ацетиленом, пропаном, емкости с сжиженным газом или легковоспламеняющимися жидкостями, промышленные взрывчатые вещества.

При моделировании последствий взрыва территорию, подвергшуюся действию ударной волны, принято делить на следующие зоны.

Зона детонации: избыточное давление в этой зоне составляет 1700...1350 кПа.

Зона действия продуктов взрыва: $\Delta P_{\phi} = 1350 \dots 700$ кПа.

Зона действия воздушной ударной волны: в пределах этой зоны для ориентировочной оценки степени разрушения зданий и сооружений выделяют:

- ♦ зону полных разрушений: $\Delta P_{\phi} \geq 50$ кПа;
- ♦ зону сильных разрушений: $50 \text{ кПа} < \Delta P_{\phi} \leq 30 \text{ кПа}$;
- ♦ зону средних разрушений: $30 \text{ кПа} < \Delta P_{\phi} \leq 20 \text{ кПа}$;
- ♦ зону слабых разрушений: $20 \text{ кПа} < \Delta P_{\phi} \leq 10 \text{ кПа}$.

Для ориентировочного определения избыточного давления ударной волны ΔP_{ϕ} , кПа, пользуются эмпирическими формулами.

При $\Psi < 2$:

$$\Delta P_{\phi} = \frac{700}{3 \cdot \sqrt{1 + 29,8 \cdot \Psi^3} - 1} \text{ кПа.} \quad (4.2.1)$$

При $\Psi > 2$:

$$\Delta P_{\phi} = \frac{22}{\Psi \cdot \sqrt{\lg \Psi + 0,158}}, \quad (4.2.2)$$

где Ψ — эмпирический коэффициент, зависящий от R в метрах и Q в тоннах, определяемый по формуле:

$$\Psi = 0,24 \frac{R}{11,3 \sqrt[3]{Q \cdot K_{\text{экв}}}}, \quad (4.2.3)$$

где $K_{\text{экв}}$ — коэффициент эквивалентности взрывчатого вещества по тротилу.

Пример 4.2.1. Рассчитать избыточное давление ударной волны и оценить последствия взрыва газозвушной смеси на складе хранения баллонов с пропаном.

Исходные данные для расчета:

- 1) количество пропана $Q = 270$ кг;
- 2) коэффициент эквивалентности по тротилу $K_{\text{экв}} = 3,74$;
- 3) расстояние до цеха $R = 72$ м;
- 4) прочностные характеристики цеха:
 - ♦ слабые разрушения 10–20 кПа;
 - ♦ средние разрушения 20–30 кПа;
 - ♦ сильные разрушения 30–40 кПа;
 - ♦ полные разрушения > 40 кПа.

Решение

1. Определяем по выражению (4.2.3) эмпирический коэффициент Ψ :

$$\Psi = 0,24 \frac{R}{11,3\sqrt[3]{Q \cdot K_{\text{экв}}}} = 0,24 \frac{72}{11,3\sqrt[3]{0,27 \cdot 3,74}} = 1,52.$$

2. Так как $\Psi < 2$, то определяем избыточное давление ударной волны по формуле (4.2.1):

$$\Delta P_{\phi} = \frac{700}{3\sqrt{1+29,8 \cdot \Psi^3} - 1} = \frac{700}{3\sqrt{1+29,8 \cdot 1,52^3} - 1} = 23,36 \text{ кПа}.$$

Вывод: так как $\Delta P_{\phi} = 23,36 \text{ кПа}$, то, следовательно, здание цеха получит средние разрушения.

Задача 4.2.1. Оценить последствия взрыва газозвдушной смеси на складе хранения баллонов с горючим газом. Исходные данные для расчета взять из табл. 26.

Прочностные характеристики цеха:

- ◇ слабые разрушения 8–15 кПа;
- ◇ средние разрушения 15–25 кПа;
- ◇ сильные разрушения 25–50 кПа;
- ◇ полные разрушения > 50 кПа.

Таблица 26

Исходные данные для задачи 4.2.1

| Параметр | Обозначение | Размерность | Варианты | | | | | | | | | |
|--|------------------|-------------|----------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Горючий газ | — | — | пропан | ацетилен | пропан | ацетилен | пропан | ацетилен | пропан | ацетилен | пропан | ацетилен |
| Кол-во | Q | т | 0,27 | 0,31 | 0,22 | 0,18 | 0,24 | 0,25 | 0,29 | 0,28 | 0,23 | 0,21 |
| Коэффициент эквивалентности по тротилу | $K_{\text{экв}}$ | — | 3,74 | 3,82 | 3,74 | 3,82 | 3,74 | 3,82 | 3,74 | 3,82 | 3,74 | 3,82 |
| Расстояние до цеха | R | м | 72 | 65 | 60 | 75 | 72 | 90 | 88 | 80 | 70 | 55 |

Вопросы

1. Что такое нижний и верхний пределы распространения пламени?
2. В чем сходство и различие понятий «температура вспышки» и «температура воспламенения»?
3. Как можно оценить вероятность взрыва паров ГЖ в помещении?
4. Как можно определить класс пожарной нагрузки помещения?
5. Как можно оценить последствия взрыва газовоздушной смеси?
6. Какие зоны действия ударной волны можно выделить при взрыве?

СПИСОК БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ССЫЛОК

1. Ноксология : учеб. пособие / Е. Е. Барышев [и др.]. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. 160 с.
2. Белов С. В., Девисилов В. А., Ильницкая А. В. Безопасность жизнедеятельности. М. : Высшая школа, 2005. 606 с.
3. Хенли Д., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. М. : Машиностроение, 1984. 528 с.
4. Белов П. Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере. М. : Академия, 2003. 512 с.
5. Справочник инженера пожарной охраны / под ред. В. С. Лебедева. М. : ИНФРА-Инженерия, 2005. 768 с.
6. Русак О. Н. Теоретические начала безопасности жизнедеятельности. Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций. СПб., 1993. 85 с.
7. Инженерная экология : учебник / под ред. проф. В. Т. Медведева. М. : Гардарики, 2002. 687 с.
8. Русак О. Н., Малаян К. Р., Занько Н. Г. Безопасность жизнедеятельности. СПб. : Омега-Л, 2007. 448 с.
9. Долгов П. П., Гусев В. Н., Автюгина И. М. Сборник задач и деловые игры по экономике энергетики и управлению энергетическим производством: учеб. пособие для энергетич. спец. вузов / под ред. П. П. Долгова. М. : Высш. шк., 1991. 192 с. : ил.
10. Ястребенецкий М. А., Иванова Г. М. Надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами. М. : Энергоатомиздат, 1989. 264 с.
11. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств (Охрана труда) / П. П. Кукин [и др.]. М. : Высш. шк., 2003. 318 с.

12. Об охране окружающей среды : федеральный закон Российской Федерации от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ. М. : Ось-89, 2008. 28 с.

13. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе : утв. Приказом Минприроды России от 6 июня 2017 года № 273 // Официальный интернет-портал правовой информации. Режим доступа: www.pravo.gov.ru (дата обращения 11.08.2017). № 0001201708110012.

14. Охрана труда в строительстве : учеб. пособие / Д. В. Коптев [и др.] ; под ред. проф. Д. В. Коптева. М. : МЦФЭР, 2007. 512 с.

15. Предупреждение чрезвычайных ситуаций на потенциально опасных объектах и объектах жизнеобеспечения : сборник нормативных документов. Екатеринбург : УралЮрИздат, 2006. 140 с.

16. Гейц И. В. Охрана труда : учебно-практическое пособие. М. : Дело и сервис, 2006. 688 с.

17. Графкина М. В., Михайлов В. А., Нюнин Б. Н. Безопасность жизнедеятельности: учебник / под общ. ред. Б. Н. Нюнина. М. : ТК Велби : Проспект, 2007.

18. Девисилов В. А. Охрана труда. М. : Форум : ИНФРА-М, 2004. 400 с.

19. Ефремова О. С. Опасные и вредные производственные факторы и средства защиты работающего от них. М. : Альфа-Пресс, 2005. 296 с.

20. О радиационной безопасности населения: федеральный закон Российской Федерации от 9 января 1996 г. № 3-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. 1996. № 3. Ст. 141.

21. Подюков В. А., Токмаков В. В., Куликов В. М. Безопасность жизнедеятельности : учеб. пособие / под ред. В. В. Токмакова. Екатеринбург : УГГУ, 2007. 314 с.

22. Об использовании атомной энергии: федеральный закон Российской Федерации от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. 1995. № 48. Ст. 4552.

23. Промышленная безопасность опасных производственных объектов: сборник нормативных документов по состоянию на 1 сентября 2007 г. Екатеринбург : УралЮрИздат, 2007. 464 с.

24. Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний : федеральный закон Российской Федерации от 24 июля 1998 г. № 125-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. 1998. № 31. Ст. 3803.

25. О пожарной безопасности : федеральный закон Российской Федерации от 21 июля 1997 г. № 69-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. 1994. № 30. Ст. 3649.

26. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: федеральный закон Российской Федерации от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. 1998. № 30. Ст. 3588.

27. О защите населения и территории от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера : федеральный закон Российской Федерации от 21 декабря 1994 г. № 68-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. 1994. № 35. Ст. 3648.

28. Васильев П. П. Практикум по безопасности жизнедеятельности человека, экологии и охране труда. М. : Финансы и статистика, 2004. 192 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

Функция Лапласа $\Phi(Z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Z e^{-t^2} dt$ [28]

| z | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------|--------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0,00 | 0,0000 | 0,011 | 0023 | 0034 | 0045 | 0056 | 0068 | 0079 | 0090 | 0102 |
| 1 | 0113 | 0124 | 0135 | 0147 | 0158 | 0169 | 0181 | 0192 | 0203 | 0214 |
| 2 | 0226 | 0237 | 0248 | 0260 | 0271 | 0282 | 0293 | 0305 | 0316 | 0327 |
| 3 | 0338 | 0350 | 0361 | 0372 | 0384 | 0395 | 0406 | 0417 | 0429 | 0440 |
| 4 | 0451 | 0462 | 0474 | 0485 | 0496 | 0507 | 0519 | 0530 | 0541 | 0553 |
| 5 | 0564 | 0575 | 0586 | 0598 | 0609 | 0620 | 0631 | 0643 | 0654 | 0665 |
| 6 | 0676 | 0688 | 0699 | 0710 | 0721 | 0732 | 0744 | 0755 | 0766 | 0777 |
| 7 | 0789 | 0800 | 0811 | 0822 | 0834 | 0845 | 0856 | 0867 | 0878 | 0890 |
| 8 | 0901 | 0912 | 0923 | 0934 | 0946 | 0957 | 0968 | 0979 | 0990 | 1002 |
| 9 | 1013 | 1024 | 1035 | 1046 | 1058 | 1069 | 1080 | 1091 | 1102 | 1113 |
| 10 | 1125 | 1136 | 1147 | 1158 | 1169 | 1180 | 1192 | 1203 | 1214 | 1225 |
| 1 | 1236 | 1247 | 1259 | 1270 | 1281 | 1292 | 1303 | 1314 | 1325 | 1336 |
| 2 | 1348 | 1359 | 1370 | 1381 | 1392 | 1403 | 1414 | 1425 | 1436 | 1448 |
| 3 | 1459 | 1470 | 1481 | 1492 | 1503 | 1514 | 1525 | 1536 | 1547 | 1558 |
| 4 | 1569 | 1581 | 1592 | 1603 | 1614 | 1625 | 1636 | 1647 | 1658 | 1669 |
| 5 | 1680 | 1691 | 1702 | 1713 | 1724 | 1735 | 1746 | 1757 | 1768 | 1779 |

Продолжение табл. II.1

| z | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 6 | 1790 | 1801 | 1812 | 1823 | 1834 | 1845 | 1856 | 1867 | 1878 | 1889 |
| 7 | 1900 | 1911 | 1922 | 1933 | 1944 | 1955 | 1966 | 1977 | 1988 | 1998 |
| 8 | 2009 | 2020 | 2031 | 2042 | 2053 | 2064 | 2075 | 2086 | 2097 | 2108 |
| 9 | 2118 | 2129 | 2140 | 2151 | 2162 | 2173 | 2184 | 2194 | 2205 | 2216 |
| 20 | 2227 | 2238 | 2249 | 2260 | 2270 | 2281 | 2292 | 2303 | 2314 | 2324 |
| 1 | 2335 | 2346 | 2357 | 2368 | 2378 | 2389 | 2400 | 2411 | 2421 | 2432 |
| 2 | 2443 | 2454 | 2464 | 2475 | 2486 | 2497 | 2507 | 2518 | 2529 | 2540 |
| 3 | 2550 | 2561 | 2572 | 2582 | 2593 | 2604 | 2614 | 2625 | 2636 | 2646 |
| 4 | 2657 | 2668 | 2678 | 2689 | 2700 | 2710 | 2721 | 2731 | 2742 | 2753 |
| 5 | 2763 | 2774 | 2784 | 2795 | 2806 | 2816 | 2827 | 2837 | 2848 | 2858 |
| 6 | 2869 | 2880 | 2890 | 2901 | 2911 | 2922 | 2932 | 2943 | 2953 | 2964 |
| 7 | 2974 | 2985 | 2995 | 3006 | 3016 | 3027 | 3037 | 3047 | 3058 | 3068 |
| 8 | 3079 | 3089 | 3100 | 3110 | 3120 | 3131 | 3141 | 3152 | 3162 | 3172 |
| 9 | 3183 | 3193 | 3204 | 3214 | 3224 | 3235 | 3245 | 3255 | 3266 | 3276 |
| 30 | 3286 | 3297 | 3307 | 3317 | 3327 | 3338 | 3348 | 3358 | 3369 | 3379 |
| 1 | 3389 | 3399 | 3410 | 3420 | 3430 | 3440 | 3450 | 3461 | 3471 | 3481 |
| 2 | 3491 | 3501 | 3512 | 3522 | 3532 | 3542 | 3552 | 3562 | 3573 | 3583 |
| 3 | 3593 | 3603 | 3613 | 3623 | 3633 | 3643 | 3653 | 3663 | 3674 | 3684 |
| 4 | 3694 | 3704 | 3714 | 3724 | 3734 | 3744 | 3754 | 3764 | 3774 | 3784 |
| 5 | 3794 | 3804 | 3814 | 3824 | 3834 | 3844 | 3854 | 3864 | 3873 | 3883 |
| 6 | 3893 | 3903 | 3913 | 3923 | 3933 | 3943 | 3953 | 3963 | 3972 | 3982 |
| 7 | 3992 | 4002 | 4012 | 4022 | 4031 | 4041 | 4051 | 4061 | 4071 | 4080 |
| 8 | 4090 | 4100 | 4110 | 4119 | 4129 | 4139 | 4149 | 4158 | 4168 | 4178 |
| 9 | 4187 | 4197 | 4207 | 4216 | 4226 | 4236 | 4245 | 4255 | 4265 | 4274 |
| 40 | 4284 | 4294 | 4303 | 4313 | 4322 | 4332 | 4341 | 4351 | 4361 | 4370 |
| 1 | 4380 | 4389 | 4399 | 4408 | 4418 | 4427 | 4437 | 4446 | 4456 | 4465 |
| 2 | 4475 | 4484 | 4494 | 4503 | 4512 | 4522 | 4531 | 4541 | 4550 | 4359 |

Окончание табл. П.1

| z | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 3 | 4569 | 4578 | 4588 | 4597 | 4606 | 4616 | 4625 | 4634 | 4644 | 4653 |
| 4 | 4662 | 4672 | 4681 | 4690 | 4699 | 4709 | 4718 | 4727 | 4736 | 4746 |
| 5 | 4755 | 4764 | 4773 | 4782 | 4792 | 4801 | 4810 | 4819 | 4828 | 4837 |
| 6 | 4847 | 4856 | 4865 | 4874 | 4883 | 4892 | 4901 | 4910 | 4919 | 4928 |
| 7 | 4937 | 4946 | 4956 | 4965 | 4974 | 4983 | 4992 | 5001 | 5010 | 5019 |
| 8 | 5027 | 5036 | 5045 | 5054 | 5063 | 5072 | 5081 | 5090 | 5099 | 5108 |
| 9 | 5117 | 5126 | 5134 | 5143 | 5152 | 5161 | 5170 | 5179 | 5187 | 5196 |
| 50 | 5205 | 5214 | 5223 | 5231 | 5240 | 5249 | 5258 | 5266 | 5275 | 5284 |

Таблица П.2

Предельно допустимые уровни звукового давления в октавных полосах частот. Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.562–96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки»

| Вид трудовой деятельности | | Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц | | | | | | | | | Уровни звука, дБА |
|---------------------------|--|---|----|-----|-----|-----|------|------|------|------|-------------------|
| | | 31,5 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | |
| 1 | Творческая деятельность, руководящая работа, научная деятельность, проектирование, программирование, преподавание и обучение | 86 | 71 | 61 | 54 | 46 | 45 | 42 | 40 | 38 | 50 |
| 2 | Высококвалифицированная работа, требующая сосредоточенности, административно-управленческая деятельность, работы в лаборатории | 93 | 79 | 70 | 68 | 63 | 55 | 52 | 50 | 49 | 60 |

Окончание табл. П.2

| Вид трудовой деятельности | Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц | | | | | | | | | Уровни звука, дБА |
|--|---|----|-----|-----|-----|------|------|------|------|-------------------|
| | 31,5 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | |
| 3 Работа, выполняемая с часто получаемыми указаниями и акустическими сигналами, требующая постоянного слухового контроля; диспетчерская работа. РМ в помещениях диспетчерской службы, кабинетах наблюдения и дистанционного управления со связью по телефону | 98 | 83 | 74 | 68 | 63 | 60 | 57 | 55 | 54 | 65 |
| 4 Работа, требующая сосредоточенности; работа с повышенными требованиями к процессам наблюдения и дистанционного управления производственными циклами. Рабочие места за пультами в кабинах дистанционного управления без речевой связи по телефону | 103 | 91 | 83 | 77 | 73 | 70 | 68 | 66 | 64 | 75 |
| 5 Выполнение всех видов работ за исключением перечисленных в пп. 1—4 и аналогичных им на постоянных рабочих местах в производственных помещениях | 107 | 95 | 87 | 82 | 78 | 75 | 73 | 71 | 69 | 80 |

Таблица П.3

Акустические характеристики звукопоглощающих облицовок

| Звукопоглощающая облицовка | Толщина слоя ЗПМ, мм | Воздушный зазор, мм | Коэффициент звукопоглощения α в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц | | | | | | | |
|--|----------------------|---------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|
| | | | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| Плита минераловатная; стеклоткань Э-0,1; металлический лист с перфорацией 33 % | 50 | 0 | 0,03 | 0,18 | 0,39 | 0,60 | 0,73 | 0,80 | 0,85 | 0,35 |
| То же | 50 | 100 | 0,08 | 0,27 | 0,53 | 0,69 | 0,76 | 0,92 | 0,87 | 0,87 |
| Супертонкое стекловолоконно, стеклоткань, гипсовая плита | 100 | 0 | 0,3 | 0,66 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,96 | 0,70 | 0,62 |
| То же | 100 | 250 | 0,4 | 0,73 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,92 | 0,80 |
| Плиты гипсовые с заполнением минеральной ватой | 20 | 0 | 0,02 | 0,09 | 0,26 | 0,54 | 0,94 | 0,67 | 0,4 | 0,4 |
| Винипор полужесткий | 30 | 0 | 0,01 | 0,15 | 0,25 | 0,56 | 0,85 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Маты из супертонкого стекловолоконна с оболочкой из стеклоткани | 50 | 0 | 0,1 | 0,25 | 0,7 | 0,98 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 3 |
| ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ БЖД..... | 4 |
| 1.1. Основы теории риска | 4 |
| 1.2. Системный анализ безопасности | 6 |
| 1.2.1. Основные положения теории надежности | 6 |
| 1.2.2. Общий метод определения возможности возникновения аварийного состояния | 7 |
| 1.3. Общая характеристика методов анализа систем «Прямые и обратные методы» | 12 |
| 1.3.1. Системный подход при оценке безопасности систем | 12 |
| 1.3.2. Априорный и апостериорный анализ безопасности систем | 12 |
| 1.3.3. Дерево причин и опасностей как система | 14 |
| 1.3.4. Моделирование опасных ситуаций методом дерева отказов | 15 |
| 1.3.5. Анализ развития опасной ситуации методом дерева событий..... | 22 |
| 1.3.6. Определение показателей надежности системы | 24 |
| 1.4. Оптимизация надежности энергоснабжения..... | 27 |
| 1.4.1. Определение числа резервных агрегатов при заданном уровне надежности | 27 |
| 1.4.2. Экономический подход к определению величины аварийного резерва | 29 |
| 1.5. Математическое моделирование при оценке надежности средств защиты персонала..... | 32 |
| 1.5.1. Описание модели | 33 |

| | |
|---|-----------|
| 1.5.2. Расчет параметров средств защиты персонала от опасных и вредных производственных факторов | 34 |
| 1.5.3. Примеры и задачи по расчету параметров СИЗ | 37 |
| Вопросы | 43 |
| ГЛАВА 2. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ БЖД..... | 44 |
| 2.1. Гигиеническое нормирование вредных веществ | 44 |
| 2.1.1. Допустимые концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе..... | 44 |
| 2.1.2. Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны | 47 |
| 2.1.3. Комбинированное действие вредных веществ на здоровье человека | 48 |
| 2.1.4. Степени опасности вредных веществ по ГОСТ..... | 49 |
| 2.1.5. Санитарно-защитные зоны (СЗЗ)..... | 49 |
| 2.1.6. Санитарно-гигиенические нормативы как критерии влияния источника воздействия на среду обитания..... | 50 |
| 2.2. Гигиеническая оценка воздушной среды..... | 53 |
| 2.2.1. Расчет рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе..... | 53 |
| Вопросы | 56 |
| ГЛАВА 3. БЕЗОПАСНОСТЬ В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА (ОХРАНА ТРУДА) | 57 |
| 3.1. Опасные и вредные производственные факторы. Условия труда работников..... | 57 |
| 3.1.1. Оздоровление воздушной среды | 57 |
| 3.2. Оценка световой среды производственных помещений | 64 |
| 3.3. Виброакустические факторы..... | 66 |
| 3.3.1. Защита от шума и вибрации | 69 |
| 3.4. Электромагнитные поля | 78 |
| 3.5. Радиационная безопасность | 80 |
| 3.6. Электробезопасность | 91 |
| 3.7. Производственный травматизм..... | 95 |
| Вопросы | 98 |
| ГЛАВА 4. ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ..... | 99 |
| 4.1. Взрывопожарная безопасность..... | 99 |

| | |
|---|---------|
| 4.1.1. Показатели взрыво-и пожароопасности веществ | 99 |
| 4.1.2. Определение категории пожарной опасности помещений | 103 |
| 4.2. Определение степени разрушения зданий и сооружений при взрыве | 105 |
| Вопросы | 108 |
| СПИСОК БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ССЫЛОК | 109 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ | 112 |

Учебное издание

Волкова Анна Альбертовна
Шишкунов Валерий Герасимович
Хоменко Александр Олегович
Тягунов Геннадий Васильевич

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ПРИМЕРАХ И ЗАДАЧАХ

Редактор *Т. Е. Мерц*
Верстка *Е. В. Ровнушкиной*

Подписано в печать 21.05.2018. Формат 70×100 1/16.
Бумага офсетная. Цифровая печать. Усл. печ. л. 9,7.
Уч.-изд. л. 4,8. Тираж 50 экз. Заказ 140.

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: +7 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: +7 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13
Факс: +7 (343) 358-93-06
<http://print.urfu.ru>

